

平成 26 年度修士論文

空間光通信におけるマルチモードファイバへの
レーザ光のカップリング効率

電気通信大学大学院 情報システム学研究科 博士前期課程

情報メディアシステム学専攻

学籍番号 1350002 有佐 傑

主任指導教員：高山 佳久 客員准教授

指導教員：末廣 尚士 教授

指導教員：佐藤 俊治 准教授

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	4
1.3	論文構成	7
第 2 章	空間光通信における大気の影響	8
2.1	大気ゆらぎ	8
2.1.1	大気ゆらぎの概要	8
2.1.2	大気ゆらぎ理論	9
2.1.3	SLC モデル、Hufnagel-Valley モデル	11
2.2	空間光通信における大気ゆらぎの影響	13
2.2.1	シンチレーションと屈折率構造定数	13
2.2.2	到来角変動	13
2.2.3	ビームワンダー	14
第 3 章	空間光通信におけるマルチモードファイバ利用に向けての検討	17
3.1	光ファイバ	17
3.1.1	光ファイバの原理・構造	17
3.1.2	光ファイバの伝搬モード	18
3.1.3	光ファイバによる伝搬光の損失	21
3.2	レーザ光の強度変動による大気揺らぎ測定	25
3.3	大気伝搬後のレーザ光の MMF へのカップリング効率	26
3.4	MMF によるデータ伝送速度の制限	32
第 4 章	電通大-NICT 間空間光通信実験	33
4.1	実験概要	33
4.2	送受信光学系	36
4.3	実験結果	40

4.3.1 電通大-NICT 間の大気ゆらぎ変動	40
4.3.2 電通大-NICT 間のカップリング効率	43
第5章 衛星-地上間光通信実験におけるマルチモードファイバの適用	45
5.1 衛星光通信における地上局の簡易化について	45
5.2 実験構成	47
5.2.1 実験システム概要	47
5.2.2 超小型光通信機器 (SOTA)	49
5.2.2 光地上局システム	50
5.3 実験結果	53
第6章 結論	59
引用文献.....	62
図目次	66
表目次	68
謝辞.....	69

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、空間光通信は光ファイバの敷設が困難なビル間、山岳地域および衛星-地上間などでの大容量高速通信手段として研究が盛んに行われている [1]。空間光通信では光ファイバケーブルを敷設する必要がなく、また光通信に用いられるレーザ光は指向性が高く通信システム相互間の干渉が無いなどという利点もある。

衛星通信においては、わが国で 1994 年に技術試験衛星 VI 型「きく 6 号」(ETS-6) が打ち上げられ、世界で初となる静止軌道-地上間での光通信実験に成功した [2]。2005 年には光衛星間通信実験衛星 (OICETS) と静止衛星 ARTEMIS との低軌道衛星-静止軌道衛星間光通信に成功し、2006 年に OICETS と NICT 宇宙光通信地上センターとの低軌道衛星-地上局間双方向光衛星実験が行われた [3, 4, 5]。2014 年現在では小型衛星搭載用超小型光通信機器 (SOTA) を搭載した小型衛星が打ち上げられ通信実験が行われている。

衛星と地上間の光通信を安定して行うためには大気ゆらぎや雲の影響による通信品質の劣化、遮断といった問題を解決する必要がある。大気ゆらぎとは気温の変化などによる大気の屈折率分布の変化により、信号となるレーザ光の波面がゆがむ現象の事である。これにより、送信側から送られるレーザ光は伝搬方向が変化し、受信側ではレーザ光の到来する角度が変動する。これを到来角変動という。さらに、レーザ光を集光し像を結ぶ際、通常では強度分布の中心が最大となるガウシアン型になるが、波面のゆがみにより光の強度が時間的に変動する現象が起こる。このことをシンチレーションという。光受信機はこの到来角度変動やシンチレーションの影響を受け、通信品質を劣化させてしまう問題が生じる。

光受信機への信号光の入射を安定させ通信品質の向上を図るため、Fine pointing mirror (FPM) や波面補正を用いる手法がある [6, 7]。FPM とは高速に

角度を変え駆動するミラーの事であり、受信光の受信軸に対する角度誤差をセンサで検出し、それを補正する形でミラーが駆動する。これにより、到来角変動による集光点の変動を防ぐ事ができる。また、波面補正は大気伝搬したレーザ光の波面のゆがみをセンサにより検出し、これと表面の凹凸を高速かつ高精度で制御できる可変形鏡と組み合わせる事で波面の歪みによる焦点の散在や変動を補償することが出来る。後者の方法は通信システムの適用が盛んに検討されているが、衛星からの光通信信号を使って実際に波面検出した例は少ない [8]。

また、雲によるレーザ光の遮断を回避するため、サイトダイバーシチの適用が挙げられている。サイトダイバーシチの概念を図 1-1 に示す。サイトダイバーシチとは、複数の地上局を用いて光回線の確保を図る概念で、雲や雨により目的の地上局と衛星とで光通信ができない場合に晴れている他の地上局を用いる方法である。2014 年現在、情報通信研究機構（NICT）は、地上・衛星間での光通信を行えるように整備された望遠鏡を東京、茨城、沖縄に保有している。また、天文台をはじめ、多くの望遠鏡が存在しており、その中には衛星との光通信におけるアンテナとなり得るものがある。これら既存の施設を活用することで、サイトダイバーシチの効果を向上する事が考えられる。しかし、この場合既存の望遠鏡に光通信の機能を備える事が必要となり、実験内容に合わせて機材の調整、設置をスムーズに行える事は光地上局の運用において重要な検討項目である。さらに、これらの問題が解決し光地上局の簡易化に繋がれば、サイトダイバーシチ実施へより柔軟な対応が可能になる [9]。

一方、地上での空間光通信はビル間での通信や河川、鉄道、新幹線道路などを横切った場所での通信手段として用いられている。さらに、地上で広く普及している光ファイバネットワークを利用できない地域も多数存在するため、空間光通信はネットワークのインフラ補完としての要求も高まっている [10]。しかし、主に使用されている空間光通信用のアンテナには光信号検出用のフォトディテクタ（PD）

が直接取り付けられており、アンテナに電力供給が必要となる。アンテナは基本的に屋外に取り付けられるため、屋外に電源を確保する必要があり、通信速度や伝送方式の変化による PD の調整等もすべて屋外でアンテナを操作しての作業となる。屋外への電源供給のいらない、屋内で作業の行えるシステムを実現できれば、より簡易的な空間光通信システムを実現でき、災害時やインフラ補完としての利用に柔軟に対応できる。

この様に、地上局内の機材の調整や設置の簡易化、複数の地上局を利用するサイトダイバーシチや地上のインフラ補完としての需要といった背景から、複雑な作業や制御システムが不要である空間光通信システムの検討は重要な研究課題である。以上が本研究を始めるに至った背景である。

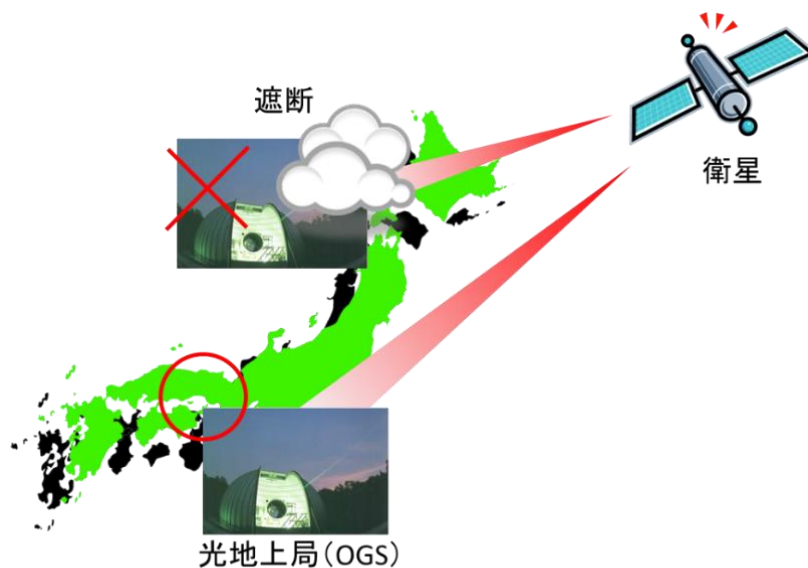


図 1-1 サイトダイバーシチのイメージ

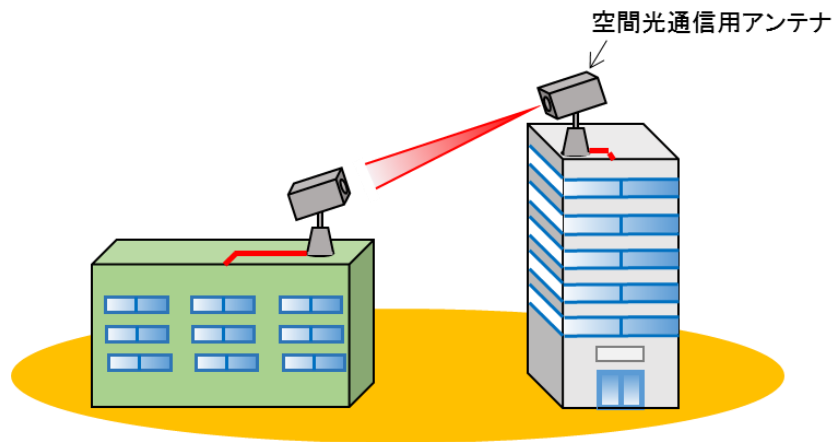


図 1-2 地上ビル間空間光通信のイメージ

1.2 研究目的

本論文では、空間光通信におけるシステムの簡易化を目的として、マルチモードファイバ（MMF）を用いたファイバ直接結合型空間光通信システムの適用を試みる。現在、市販されている地上のビル間通信用の空間光通信装置の概要を図 1-3 に示す。この空間光通信システムにはアンテナ部分に直接光検出器として PD や長距離伝播のため光／電気、電気／光変換器が取り付けられている。空間光通信システムのアンテナは一般的にビルの屋上の様な屋外の高い場所に設置される。この空間光通信システムでは屋外に設置したアンテナに電力供給を行うため電源を確保する必要がある。また、今後の更なる空間光通信の高速・大容量化による伝送方式や通信速度の変化にともない、アンテナに取り付けられている PD や光／電気、電気／光変換器をその都度性能に合わせて取り替える必要がある。簡易化の観点から、屋外への電力供給がなく、一度設置したアンテナを再度調整せずに通信方式の変化に対応できるシステムが望ましい。本論文では、これらの要件を満たすためにファイバ直接結合型の空間光通信システムを採用する。簡易化を目的としたファ

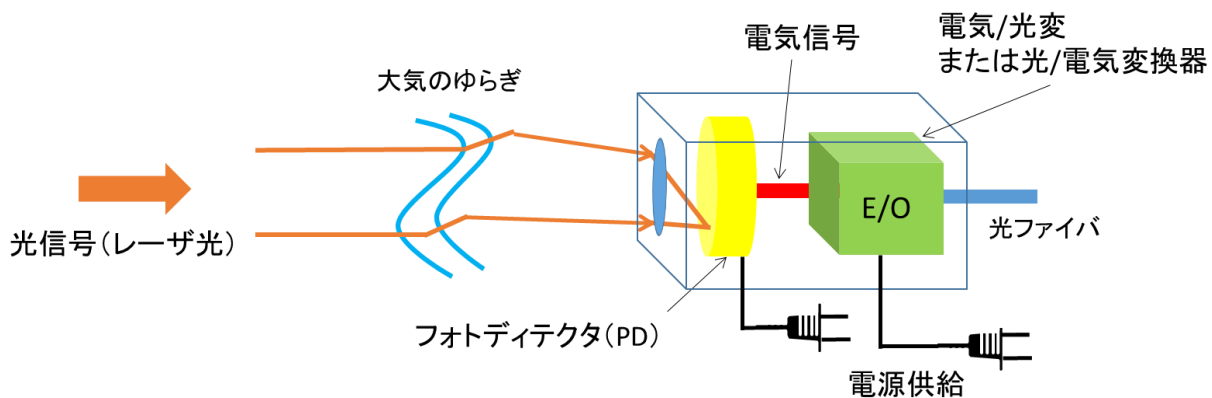


図 1-3 PD をアンテナに直接取り付けした受信装置

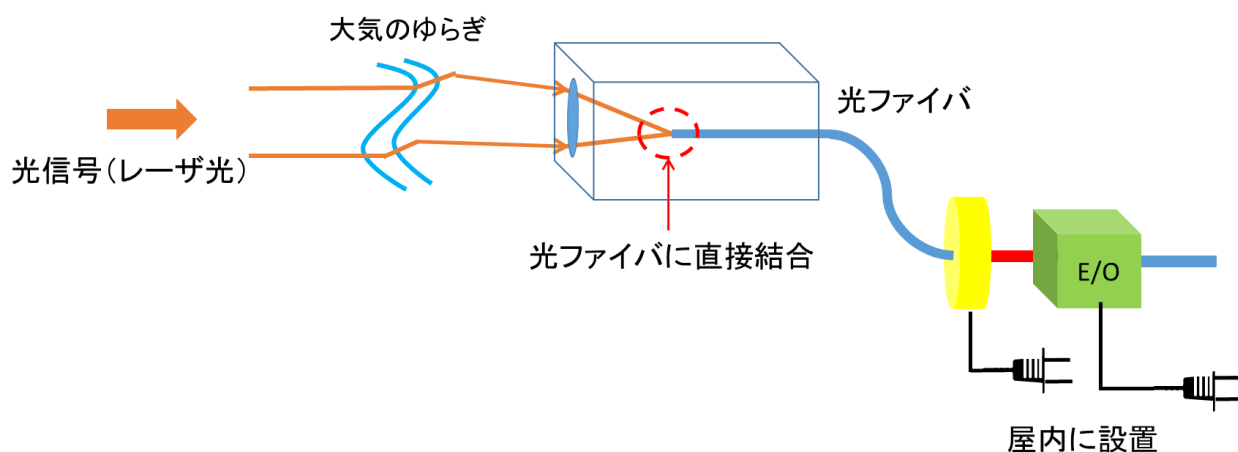


図 1-4 簡易化を目的としたファイバ直接結合の受信装置

イバ直接結合型空間光通信システムのイメージを図 1-4 に示す。大気中を伝播したレーザ光を光ファイバに導き、光信号を検出する仕組みになっている。そのため、アンテナに取り付けられていた PD や変換機をアンテナから離れた屋内に設置し、取替えや電力供給等を屋内で行うことが出来る。また、光ファイバに電力供給は不要なためアンテナ用に電源を用意する必要がなくなる。さらに、空間光通信を災害時の臨時回線として利用するといった場面においても、アンテナを電源か

ら切り離して設置できるので、システム全体の設置場所の選択を柔軟に行える。

しかし、大気中を伝播したレーザ光は大気ゆらぎの影響により波面が歪み、受信側で観測する焦点が広がってしまう [11]。一般的に地上の光ファイバネットワークで利用されているシングルモードファイバ (SMF) のコア径は約 $10\text{ }\mu\text{m}$ とであり、光ファイバに直接レーザ光が入射するカップリング効率は非常に小さくなる。SMF への直接結合型空間光通信システムについての先行研究として、高速に駆動するミラーを用い受信光の到来角変動を補償する追尾システムを搭載した空間光通信システムが研究されている [6, 12]。光ファイバネットワークにおいて広く用いられている高速の光変調器や光増幅器の入出力の多くは SMF によって行われる。そのため、高速追尾システムを搭載した SMF 結合の空間光通信システムは既存の光デバイスを流用できるという利点がある。しかし、これは同時に、前述したシステムの設置や利用の利便性を低減する事になる。

本検討では、光通信装置の構成を簡易化し、設置場所選択の柔軟性の向上を目指す。そこで、追尾システムのような複雑な構成の機能を使用せずに光のファイバへの直接結合に着目した検討を行う。まず、ファイバ直接結合型空間光通信システムのカップリング効率において SMF より高いカップリング効率が期待できる MMF を採用し、その有用性について実測と理論から検討を行う。MMF は SMF に比べコア形が比較的大きく、高精度な追尾システム無しに大気ゆらぎによる影響を包括できると考えられる。MMF を用いる際、伝搬するモード毎に遅延時間が異なるモード分散により伝送帯域が制限される。そのため、モード分散による通信への影響を数値計算から見積もり、簡易化した空間光通信システムのデータ伝送速度の上限についても検討する。

具体的な実験内容として、実際に MMF を用いたファイバ直接結合の空間光通信システムを約 7.8 km 離れた地上ビル間に構築し通信実験を行った。大気ゆらぎに対する MMF へのレーザ光のカップリング効率を計測し MMF の有用性につ

いて検討を行った。さらに、理論式による大気伝搬後のレーザ光の MMF へのカップリング効率理論式を新たに導出した。MMF のカップリング効率を見積もる事は回線設計を行う上で重要であり、実測値と理論式を比較する事で理論式の評価も行った。

また、光地上局の簡易化を目的とした MMF の利用についても検討を行う。具体的には、地上-衛星間における MMF へのカップリング効率を衛星から送信されたレーザ光の強度変動を基にシミュレーションする。

1.3 論文構成

第 2 章では空間光通信において問題となる大気ゆらぎについて、いくつかの理論モデルと共に説明する。大気ゆらぎによって引き起こされる現象の中から空間光通信に関連する到来角変動やシンチレーションといった現象を紹介する。第 3 章では大気伝搬したレーザ光の強度変動から大気ゆらぎの大きさを推定する方法を紹介する。また、空間光通信において大気伝搬後のレーザ光が MMF へ結合する際のカップリング効率の理論式を導入する。第 4 章では、実際に電通大・NICT 間に空間光通信システムを構築し、大気ゆらぎの測定および、カップリング効率の理論値と実測値との比較を述べる。第 5 章では、MMF を用いた光地上局の簡易化の検討を行う。実際に SOTA を用いた衛星-地上間光通信実験で得られた受信光の強度変動からカップリング効率をシミュレーションし、MMF を用いた場合を想定して評価した。最後に、第 6 章で結論と今後の課題について述べる。

第2章 空間光通信における大気の影響

2.1 大気ゆらぎ

2.1.1 大気ゆらぎの概要

天体望遠鏡で星を眺める際、星からの光は地球大気の様々な層を伝搬する中で波面が歪みチラチラゆらいだ像が観測される。大気ゆらぎは、気温の変化による屈折率分布の変動により波面が歪むことによって生じる [13]。これにより空間光通信では受信システム側で到来角変動やシンチレーションといった問題が引き起こされる。さらに風の影響等で一様な値を持つ屈折率分布の大きさが細分化される。図 2-1 に大気の屈折率分布の変化によって、受光面での強度分布が歪んでいる様子を示す。なお、大気の屈折率分布は時間的にも変化するため、同図の強度分布は時間的な変化も示す。地上から約 20 km の大気の層が地球大気の 75 % を含み、地表との温度差によって大気ゆらぎの影響を大きく受ける場所となる [14]。

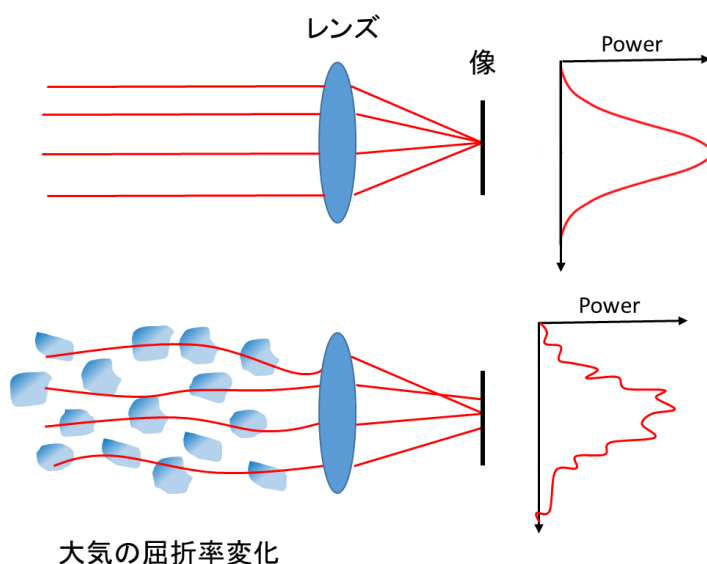


図 2-1 大気ゆらぎによる像の歪み

2.1.2 大気ゆらぎ理論

大気ゆらぎについて複数の理論モデルが存在する。本節では二つの代表的な理論モデルを紹介する。

大気ゆらぎのような屈折率の不均一な分布は、それぞれ固有の屈折率を持つ多数の小さな領域の集まりであると考えることが出来る [13]。等方性をもつ乱れの場合には、波数 κ と渦の大きさ L との関係は $L = 2\pi/\kappa$ となる。ここでパワースペクトル密度 $\Phi_n(\kappa)$ を Kolmogorov の理論から 3 つの異なる領域でそれぞれ考える。まず、 κ が非常に小さい場合、スケールの大きさが地理学、気象学的問題となりパワースペクトル密度 $\Phi_n(\kappa)$ の数学的表現を Kolmogorov の理論から得ることは出来ない。 $\Phi_n(\kappa)$ の形を決められる様になる臨界点を臨界波数 κ_0 として、kolmogorov の理論から $\Phi_n(\kappa)$ の関数を

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033 C_n^2 \kappa^{-1/3} \quad (2.1)$$

のようなモデルで表す。ここで C_n^2 は屈折率構造定数であり、ゆらぎの強さを表すパラメータである。 $L_0 = 2\pi/\kappa_0$ で表されるスケールサイズを乱れの外部スケールといい、典型的な L_0 の値は 1~100 m 程度である [15]。 κ がさらに大きくなり領域が小さくなると乱流の渦は粘性力のためエネルギーを散逸させてしまう。その臨界点を κ_m とすると $\kappa > \kappa_m$ の場合 $\Phi_n(\kappa)$ はより早く減衰する。この早い減衰を Tatarski モデルから

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033 C_n^2 \kappa^{-1/3} \left(\frac{-\kappa^2}{\kappa_m^2} \right) \quad (2.2)$$

と表す。ここで $\kappa_m = 5.92/l_0$ であり、 $\kappa > \kappa_0$ である。また、 l_0 は大気ゆらぎの空間分布の内部スケールである。式(2.1) と式(2.2) のスペクトルはともに積分不可能な極を原点に持っている。地球の大気は有限であるが、式(2.2) の $\kappa \rightarrow 0$ にしたときにこれらのスペクトルが無限の値を示す。これらのモデルの欠点を補うために Von Karman スペクトルとして知られる関数が採用される。そのスペクトルは近似的

に、

$$\Phi_n(\kappa) \cong \frac{0.033C_n^2}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{1/6}} \exp\left(\frac{-\kappa^2}{\kappa_m^2}\right) \quad (2.3)$$

$$\lim_{\kappa \rightarrow 0} \Phi_n(\kappa) = \frac{0.033C_n^2}{\kappa_0^{1/3}} \quad (2.4)$$

で表される。式(2.3) $\kappa = 0$ で値が有限になるように人為的に導入された式であり、式(2.3) を用いることで、小さな領域でも有限の値となる。

図 2-2 に式(2.2)と式(2.3)のモデルに対して $\Phi_n(\kappa)$ と κ の関係を表す。図 2-2 には波数 κ_0 と κ_m の位置を示し、その間の領域では $\kappa^{-11/3}$ に従った振る舞いをする。

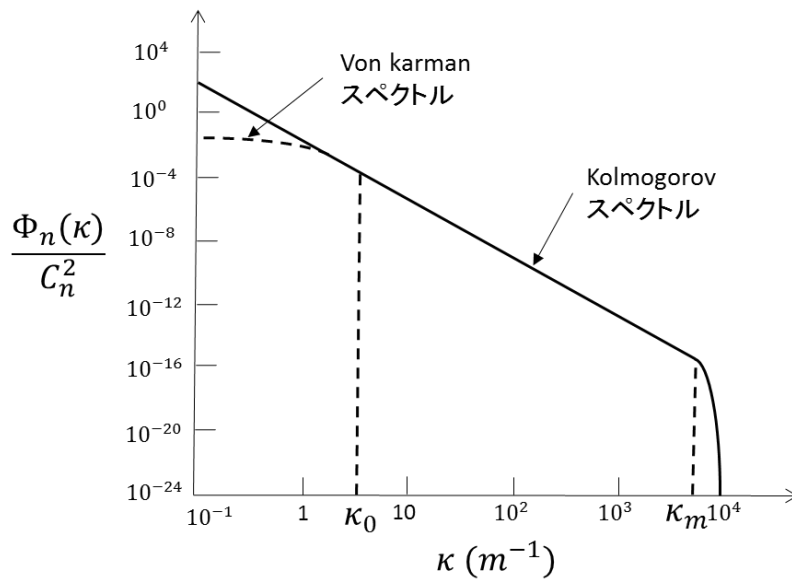


図 2-2 屈折率ゆらぎのパワースペクトル密度

2.1.3 SLC モデル、Hufnagel-Valley モデル

大気ゆらぎの大きさを表す C_n^2 は実験や解析によって複数のモデルが高度 h の関数として定義されており、本節では二つのモデルを説明する。紹介するどちらのモデルも C_n^2 の値は高度によって変化し、同じ高さの場所では定数として定義される。広く使われているモデルの一つとして SLC モデルがある [16]。SLC モデルは daytime モデルが式(2.5)で表され、night モデルが式(2.6)で表される。

$$\begin{aligned}
 C_n^2(h) &= 1.7 \times 10^{-14}, & 0 < h < 18.5 \text{ m} \\
 &= 3.13 \times 10^{-13} / h^{1.05}, & 18.5 < h < 240 \text{ m} \\
 &= 1.3 \times 10^{-15}, & 240 < h < 880 \text{ m} \\
 &= 8.87 \times 10^{-7} / h^3, & 880 < h < 7200 \text{ m} \\
 &= 2.0 \times 10^{-16} / h^{1/2}, & 7200 < h < 20000 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned}
 C_n^2(h) &= 8.4 \times 10^{-15}, & 0 < h < 18.5 \text{ m} \\
 &= 2.87 \times 10^{-12} / h^2, & 18.5 < h < 110 \text{ m} \\
 &= 2.5 \times 10^{-16}, & 110 < h < 1500 \text{ m} \\
 &= 8.87 \times 10^{-7} / h_3, & 1500 < h < 7200 \text{ m} \\
 &= 2.0 \times 10^{-16} / h^{1/2}, & 7200 < h < 20000 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

また、図 2-3 に高さを変化させたときの上記 2 式の変化を示す。一般的に C_n^2 は地表付近が最も高く、高度が上がるにつれて値が下がっていく。また、1500 m 以上では昼と夜間で C_n^2 の値が変化しないため大気ゆらぎの変化が少ないと考えられる。

SLC モデルは C_n^2 のおおよその値を知ることには適しているが、実際は測定や実験を行う場所ごとに C_n^2 の値は変化する。実際、SLC モデルはハワイのマウワ島ハレアカラ山にある AMOS (air force maui optical station) で測定したデータを基に作成されている。地域ごとの C_n^2 の変化を考慮したモデルに Hufnagel-Valley モデ

ルがあり、以下の式(2.7)で表される。

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{v}{27} \right)^2 (10^{-15} h)^{1.0} \exp \left(-\frac{h}{1000} \right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp \left(-\frac{h}{1500} \right) + C_n^2(0) \exp \left(-\frac{h}{100} \right) \quad (2.7)$$

h は高度、 v は地上の風速である。上記のように地上にて測定された $C_n^2(0)$ をパラメータに持っているため、SLC モデルの問題点を補っている。 $C_n^2(0)$ の値を変化させると高度 1 km 以下の C_n^2 に影響があり、 v の値を変化させると高度約 10 km の C_n^2 に影響がでる。

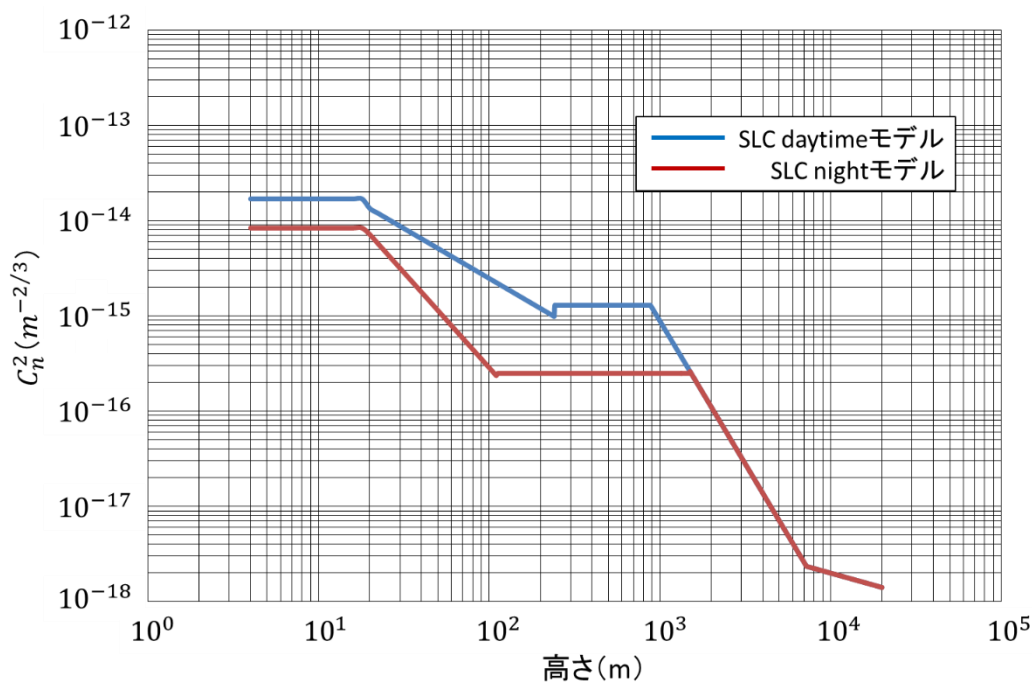


図 2-3 SLC モデルにおける高度と屈折率構造パラメータの関係

2.2 空間光通信における大気ゆらぎの影響

2.2.1 シンチレーションと屈折率構造定数

地上から夜空を見上げると星がチラチラと瞬くように、地上ビル間でもレーザー光を伝搬させると受信側ではレーザー光の受信強度に変動が見られる。これは前節で述べた大気ゆらぎによる影響が原因であるが、このように光の強度が大気の影響によって時間的に変動する現象をシンチレーションという。このシンチレーションは大気ゆらぎの大きさを表す屈折率構造定数 C_n^2 と関係しており、受信強度 I に対して

$$\sigma_I^2 = \left\langle \left(\ln I - \langle \ln I \rangle \right)^2 \right\rangle = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2.8)$$

で表される [17]。 L は伝搬距離、 k は波数、 σ_I^2 はシンチレーションインデックスであり、 $\langle \rangle$ は時間平均を表す。シンチレーションインデックスは受信システム側での純粋な強度変動の大きさを知る指標として使われる。上記の式(2.8)は受信システムの開口径が非常に小さい場合を仮定しており、一般的に 1 の値を超える変動は強いゆらぎであると言われている。

2.2.2 到来角変動

伝搬したレーザー光が受信機に到達した時、波面が大気ゆらぎの影響でゆがみ図 2-4 の様に集光点での到来角が変動する。理想的な状態から大気ゆらぎの影響を受けた時での位相シフトの分散を C_n^2 で表し、そこから到来角の分散を求める。直径 D のレンズで集光される場合の位相シフトを ΔS 、その時の光路差を Δl とすると

$$k\Delta l = \Delta S \quad (2.9)$$

となる。図 2-4 の β が十分小さく、 $\sin \beta \cong \beta$ となる場合、到来角は以下で表される。

$$\beta = \frac{\Delta l}{D} = \frac{\Delta S}{kD} \quad (2.10)$$

式(2.10)の位相シフトを位相ゆらぎの大きさを表す位相構造関数 D_s で置き換え、到来角の分散を

$$\langle \beta^2 \rangle = \frac{\langle (\Delta S)^2 \rangle}{(kD)^2} = \frac{D_s(D, L)}{(kD)^2} = 2.91 D^{-1/3} \int_0^L C_n^2(z) dz \quad (2.11)$$

$$D_s(D, L) = 2.91 C_n^2 k^2 L D^{5/3} \quad (2.12)$$

と表す。式(2.11)は無限の平面波を仮定し、 $D \gg l_0$ とする。

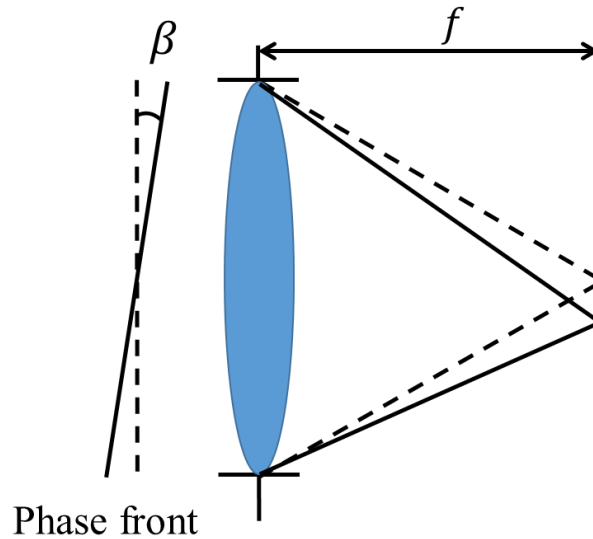


図 2-4 到来角変動

2.2.3 ビームワンダー

衛星および地上局からレーザ光を出射する時、レーザ光は大気ゆらぎの影響により波面が歪み伝播方向が変動する。この現象をビームワンダーといい、図 2-5 に時間変化するビームワンダーのイメージを示す。図中の t_1 から t_4 は経過時間を表し

ており、実線の円はレーザ光の照射領域、および影つきの小さな円は輝度の一番強い箇所を表している。ここで $\langle r_c^2 \rangle$ は大気ゆらぎのない理想的な場合と大気の影響を受けた場合での照射エリアの中心距離の分散を表している。 $\langle r_c^2 \rangle$ は大気ゆらぎの強さを表す C_n^2 を用いて以下の式(2.13)で表される。 [18]

$$\langle r_c^2 \rangle = 7.25(H - h_0)^2 \sec^3(\zeta) W_0^{-\frac{1}{2}} \int_{h_0}^H C_n^2(h)^2 \left(1 - \frac{h - h_0}{H - h_0}\right)^2 dh \quad (2.13)$$

衛星の高度を H 、地上局の高度を h_0 、衛星・地上局間のレーザ光伝播距離を L 、地上局の天頂から衛星への角度を ζ 、出射光のビームウエストを W_0 とする。ここではレーザ光はガウスビームであり、望遠鏡開口による回折は無視している。また、衛星と地上局の位置関係を図 2-6 に示す。

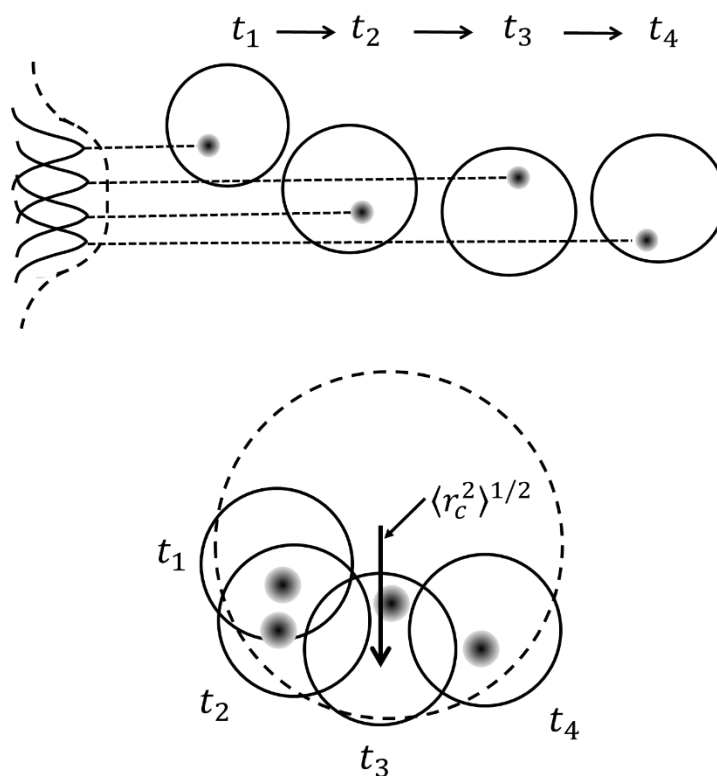


図 2-5 大気ゆらぎによるレーザ光照射エリアの時間変動

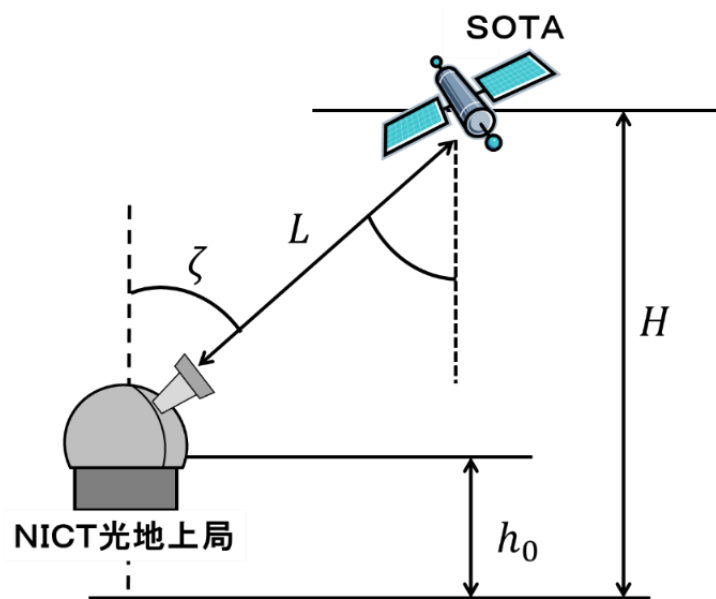


図 2-6 衛星-地上局の位置関係

第3章 空間光通信におけるマルチモード ファイバ利用に向けての検討

3.1 光ファイバ

3.1.1 光ファイバの原理・構造

本章では空間光通信における MMF の利用についてカップリング効率を中心に検討を進める。まず本節では光ファイバの原理、構造について説明し MMF の特徴を述べていく。

光ファイバはコアと呼ばれる芯と外側を覆うクラッドとの屈折率差によって光を閉じ込め、光を遠く離れた場所へ送る伝送路である。主に、通信の分野では光信号を伝送するケーブルとして用いられ、また精密部品の溶接に使う高出力レーザのアンプとしても利用されている。代表的な光ファイバであるステップインデックスファイバーを図 3-1 に示す。一般的に通信で使われる光ファイバは石英ガラスで出来ており、コアには GeO_2 や P_2O_5 のような添加物を加えることでクラッドより屈折率を高くしている [19]。図 3-2 にファイバ内を光が伝搬する様子を幾何光学的に示す。幾何光学的観点から、光はフレネル反射に基づき、屈折率の高い物質から低い物質に入射すると入射角は屈折角より大きくなり境界面に対して平行に近づく。入射光が境界面に対して平行に近づくときある角度から光は透過せずすべての光がコア内で反射するようになる。このため、光ファイバには最大受光角が存在し、光とファイバを結合するためには最大受光角度以下に入射角を設定する必要がある。

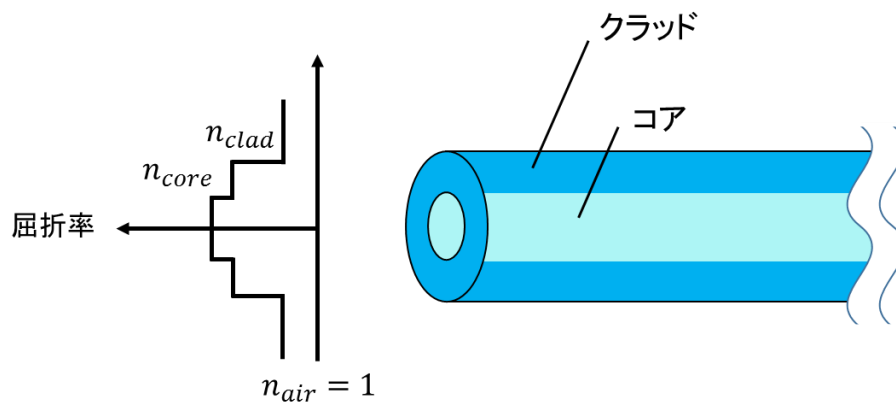


図 3-1 光ファイバの構造

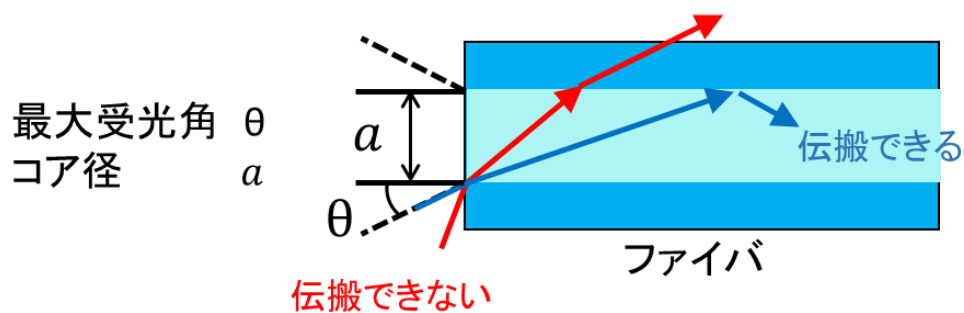


図 3-2 ファイバ内を伝搬する光の様子

3.1.2 光ファイバの伝搬モード

光ファイバ内を伝搬する光は伝搬する経路、またはファイバに入射する角度によっていくつかのモードに分けられる。例えば、図 3-3 の様に伝搬する光が互いに強めあいながら伝播する光に関してはファイバ内で存在できるが、位相がずれお互いが干渉してしまうとファイバ内では存在できない。この様にファイバ内を伝搬できる光の組を伝搬モードと呼び、入射角が小さいものから 0 次モード、1 次モード、2 次モード・・・と言う。光ファイバの伝搬モード数 N はで表され

$$2a \sin \theta_c \geq N \frac{\lambda}{2} \quad (3.1)$$

$$\theta_c = \sin^{-1} \sqrt{\frac{2(n_{core} - n_{clad})}{n_{core}}} \quad (3.2)$$

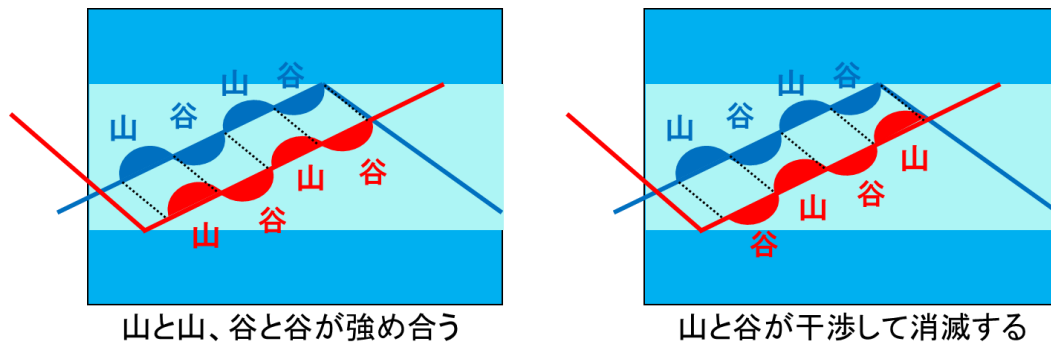


図 3-3 光の伝搬モードのイメージ

る。 a はコア径、 λ は波長、 θ_c は臨界角である。臨界角はコアとクラッドの屈折率 n_{core} 、 n_{clad} で表される。

光ファイバは伝搬モードの数により SMF と MMF の 2 つに分類できる。図 3-4 に SMF と MMF 内を光が伝搬する様子を示す。伝搬モードが 1 つしかない光ファイバを SMF という。SMF のコア径は 6～10 μm 程度であり、一般的に通信分野で扱われる。MMF のコア径は 62.5～1000 μm と SMF より大きく複数のモードを伝搬できる。また、コア径が大きいため容易にレーザー光を結合でき、曲げに強く高出力ファイバレーザなどに用いられる。しかし MMF は複数のモードがそれぞれに違う伝搬経路を通るため、モード毎に到着時間が異なることで図の様にモード分散が生じる。このため、MMF を用いるときには伝送帯域が制限されてしまう。例えば、図 3-5 の様に出射光のパルス幅が MMF を伝搬する過程で時間的に広がる

ため隣接するパルスが重なってしまい終着点では正しい符号が認識できないことが起きてしまう。MMF の伝送帯域については 3.4 節にて再び計算式を挙げて紹介する。

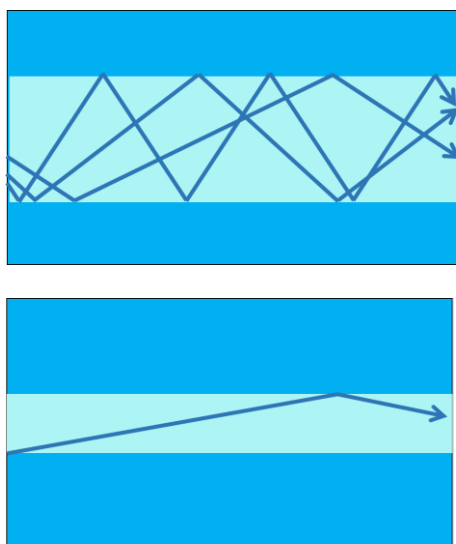


図 3-4 上：マルチモードファイバ 下：シングルモードファイバ

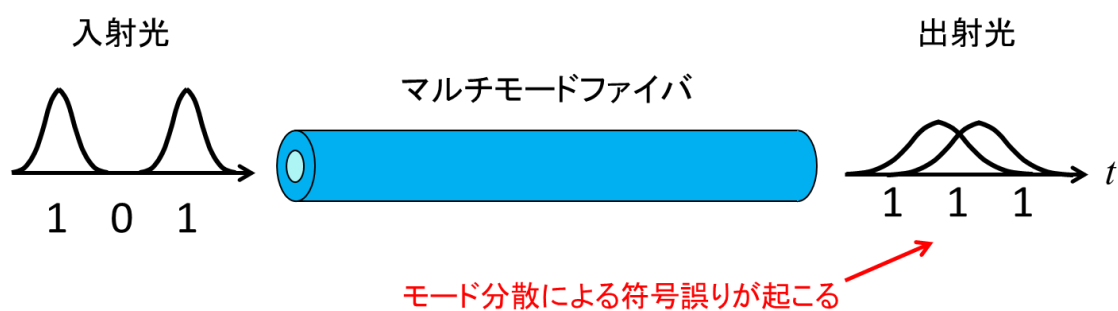


図 3-5 MMF によるモード分散

3.1.3 光ファイバによる伝搬光の損失

光信号を空間から光ファイバを通して伝送する場合には吸収や散乱、端面での反射などによって信号が減衰してしまう。通信において、受信機側で信号を検出できる最小レベルはデバイスの性能上決まっており、伝送損失が通信システムの光路長に制限を与える。光システムにおいて損失が生じる点は随所にあり、これらによる信号の減衰を考慮してシステム設計を行う [20]。図 3-6 のように空間からファイバに、ファイバから空間に光が伝搬する際、ファイバと空間の屈折率差によってフレネル反射による信号光の損失が起こる。

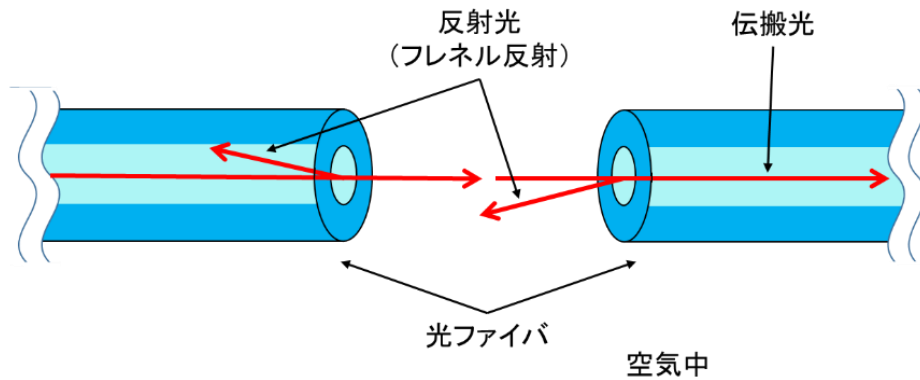


図 3-6 光ファイバ端面での反射損失

フレネル反射のイメージを図 3-7 に示す。フレネル反射による損失の割合は屈折率差と信号光の入射角に依存し、p 波 s 波に分け

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (3.3)$$

$$r_p = \frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \quad (3.4)$$

で表される。ここで、s 波は入射面に垂直に電界が振動する偏光をいい、入射面に

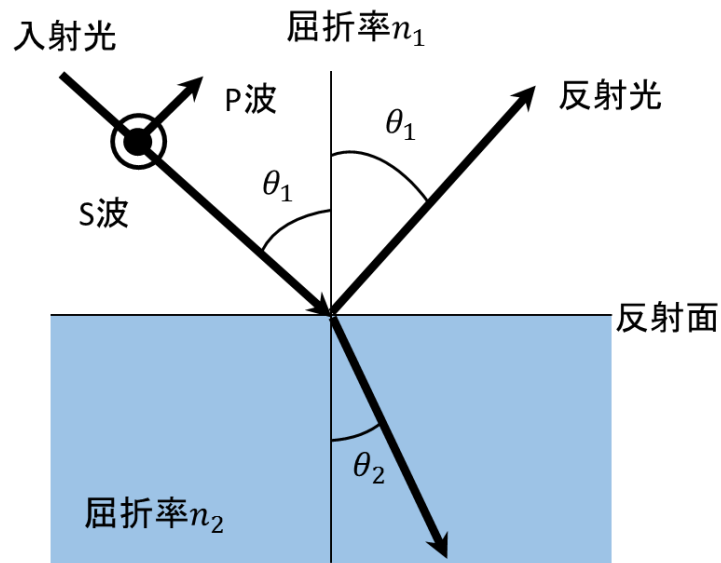


図 3-7 フレネル反射のイメージ

平行に振動するのは p 波という。例として図 3-7 に空間（屈折率 1）からシリカ（屈折率 1.45）に光が入射する時、角度変化に対する反射率を示す [21]。入射角を θ_1 、屈折角を θ_2 とし、 n_1 が空気の屈折率、 n_2 がシリカの屈折率を表している。

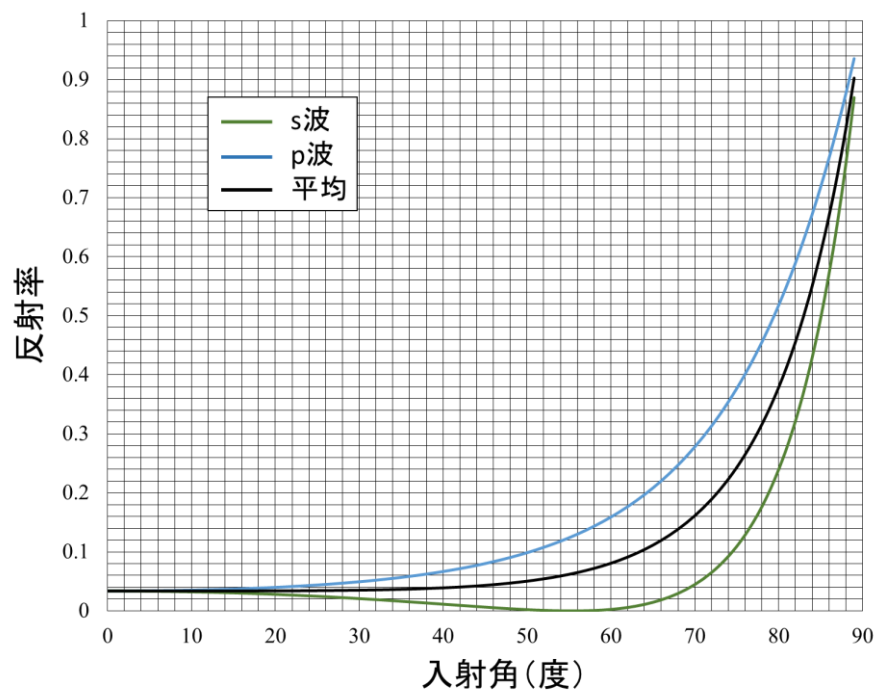


図 3-8 角度変化に対する反射率（屈折率：空気 1→シリカ 1.45）

光ファイバにはガラスやプラスチックが材料として使われるが、より低い吸収特性を持つガラスが長距離通信では利用されている。しかし、純度の高いガラスであっても特定の波長領域に対して高い吸収を示す。これをガラスの固有吸収という。図 3-9 に Ge ドープの石英ファイバの減衰 (dB/km) を示す [20]。ガラスの固有吸収は短波長紫外 (UV) 域と赤外 (IR) 域で非常に強いことがわかる。そしてどちらも可視光領域に近づくにつれて吸収が低くなることがわかる。また、光の波長よりも小さなサイズでの粒子による光の散乱などにより短波長側での吸収は大きくなる。これらのことも考慮され、光ファイバネットワークにて通信波長帯として石英ファイバの吸収が少ない 1.3 μm 、1.5 μm 帯の光源が使用されている。また、両波長と特に 1.55 μm の波長では大気伝搬においても吸収損失がほかの波長帯に比べ低く、空間光通信の分野にも利用されている [12]。本論文においても、空間光通信実験には 1.5 μm のレーザ光を送信側に設置し利用している。図 3-10 に水平伝搬 1 km を想定した場合の大気の透過スペクトルを示す。また、地上からの高さ 3 m とし雨や曇りの日ではないとする。

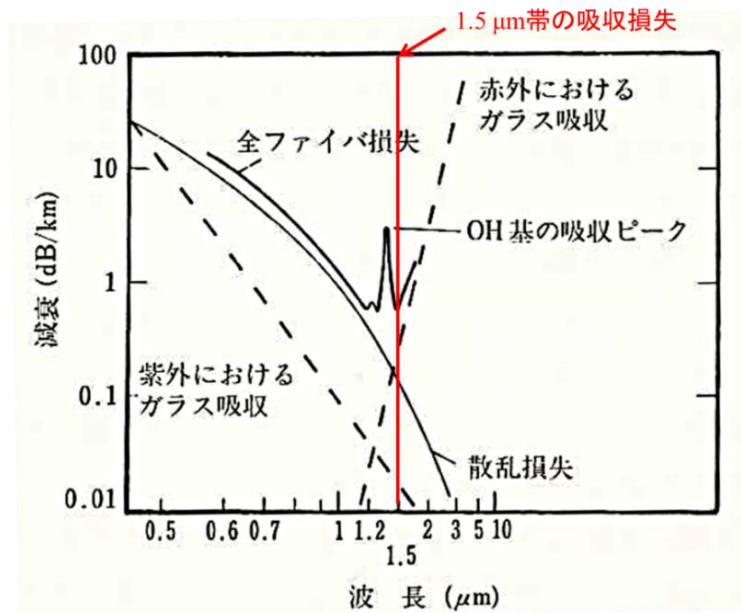


図 3-9 Ge ドープの石英ガラスファイバの減衰

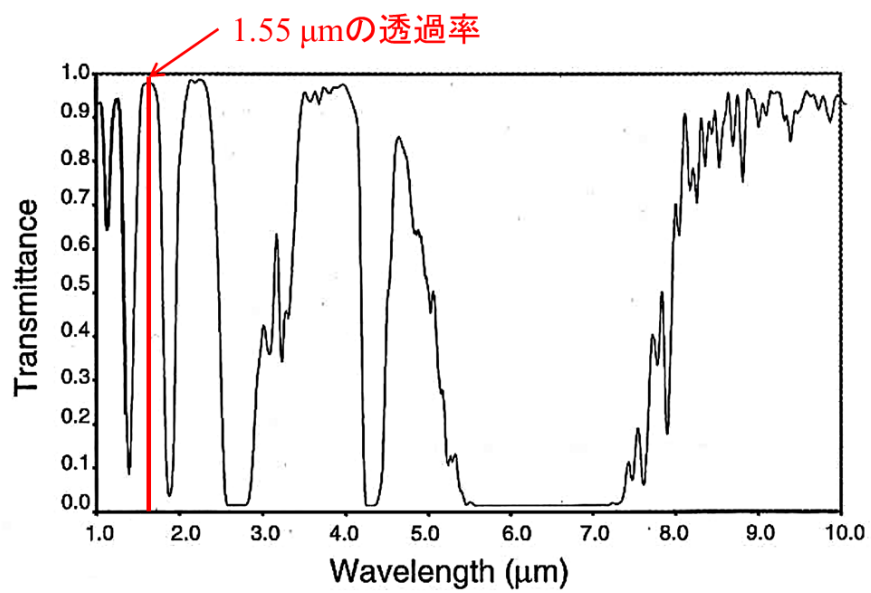


図 3-10 水平伝搬 1 km を想定した大気の透過スペクトル

3.2 レーザ光の強度変動による大気揺らぎ測定

大気揺らぎの大きさを表す屈折率構造定数 C_n^2 を 2.2.1 節で説明したシンチレーションインデックスから求める。図 3-11 のように送受信系を設置し、大気揺らぎ存在下でレーザ光の強度変動を測定する。送信側からは一定のパワーでレーザ光を大気中に出射し、受信側でレーザ光を受信する。この時、レーザ光の受信強度は大気揺らぎの影響により、図のように変動して計測される。この受信強度からシンチレーションインデックスを求める。

また、式(2.8)のシンチレーションインデックスは非常に小さな開口系を持つ受信機にて強度変動を測定した場合を想定している。しかし、実際に空間光通信で用いる受信光学系は有限な大きさの開口径を持っている。例として、今回測定に用いた受信光学系の開口径は直径 10 cm である。測定される強度変動の大きさは開口

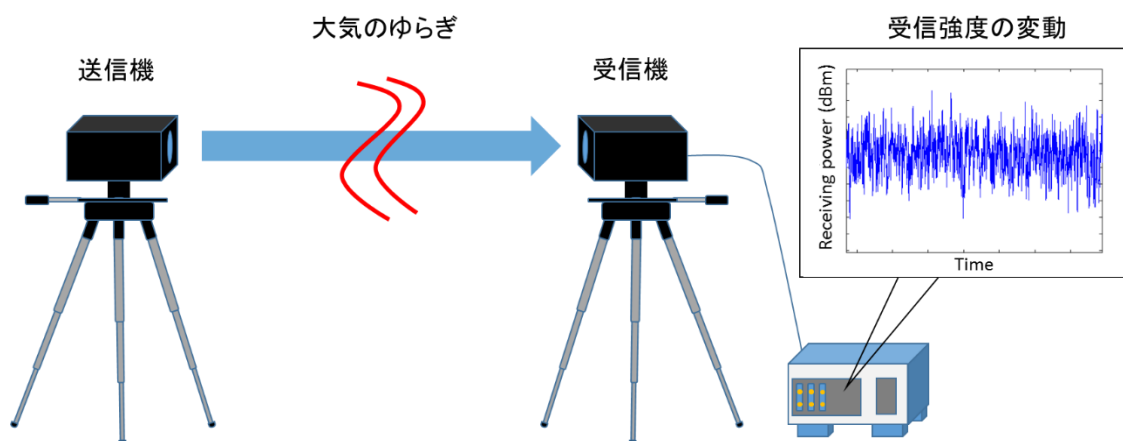


図 3-11 大気揺らぎ測定の概要

径の大きさによって変化し、開口径が大きいほど変化は小さくなる [22]。本来、大気揺らぎそのものは開口径の大きさによって変化するものではないため開口径の大きさを考慮した式によって C_n^2 を計算する必要がある。開口径 D を持つ受信機に

よって得られた強度変動 $\sigma_I^2(D)$ と非常に小さな開口径を持つ受信機によって得られた強度変動 $\sigma_I^2(D=0)$ とで式(3.5)の様に表す [17]。

$$\frac{\sigma_I^2(D)}{\sigma_I^2(D=0)} = \left[1 + 1.07 \left(\frac{kD^2}{4L} \right)^{7/6} \right]^{-1}. \quad (3.5)$$

式(3.5)を式(2.8)から以下のように書き換える。

$$\sigma_I^2(D) = \left[1 + 1.07 \left(\frac{kD^2}{4L} \right)^{7/6} \right]^{-1} \times 1.23k^{7/6} Cn^2 L^{1/6} \quad (3.6)$$

よって、強度変動から Cn^2 を求める式を以下の式(3.7)で表す。

$$Cn^2 = \frac{\sigma_I^2(D) \left[1 + 1.07 \left(\frac{kD^2}{4L} \right)^{7/6} \right]}{1.23k^{7/6} L^{1/6}} \quad (3.7)$$

Cn^2 をある一定の値に仮定した時、開口径の変化に対するシンチレーションインデックスの値を図 3-12 に示す。図 3-12 から、仮にまったく同じ大気中を伝搬したレーザ光であっても受信系の開口径が大きいほど受信側で計測される強度変動は小さくなることが分かる。

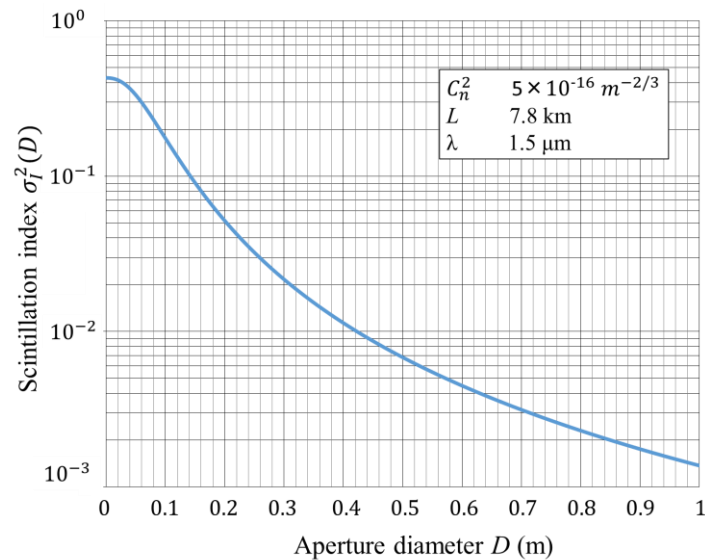


図 3-12 開口径の変化に対するシンチレーションインデックスの変化

3.3 大気伝搬後のレーザ光の MMF へのカップリング効率

ファイバ直接結合型の空間光通信システムに限らず光源と光ファイバ、光ファイバと光ファイバを結合し通信を行う際、光ファイバ端面での反射などによって結合損失が生じる。空間光通信の場合では、大気中を伝搬したレーザ光は大気ゆらぎの影響により波面が歪み、受信側では到来角変動などの問題が生じるためカップリング効率が更に減少する。回線設計を行う上で大気ゆらぎの影響によってどれだけ受信強度が減衰するのか把握することは重要である。本章では新たに大気伝搬後のレーザ光の MMF へのカップリング効率理論式を導出し、シミュレーションを行った。

幾何光学的観点から、レーザ光を集光し光ファイバへ結合する場合、光ファイバの最大受光角の大きさを表す Numerical aperture (NA) に対するレーザ光の入射角の割合、コア径の大きさに対するビーム径の大きさの割合は重要なパラメータである。この二つの評価指標から、MMF へのカップリング効率をレーザ光のビーム品質を表すビーム伝搬率 M^2 を用いて以下の式(3.8)で表す [23]。

$$\eta = \left[1 - \exp\left(-\frac{2M_F^2}{M^2}\right) \right]^2 \quad (3.8)$$

ここで M_F^2 は、光ファイバのコア半径 a 、および最大受光半角 θ を用いて

$$M_F^2 = \frac{\pi}{\lambda} a \theta \quad (3.9)$$

と定義される。 M^2 はレーザ光がシングルモード TEM_{00} に近いかを表す指標であり、どのくらい小さなビームウエストに集光できるかが分かる。一般的に、 M^2 の値はレーザ光の広がり角、波長、ビームウエストの値で決定する。この M^2 について、水平伝搬後のレーザ光が大気の影響により歪みを受けた場合、下記の式(3.10)で表される [24]。

$$M^2 = \sqrt{\left(M_0^2\right)^2 + 2\omega_0^2 k^2 T L + \frac{8}{3\omega_0^2} T L^3 + \frac{4}{3} k^2 T^2 L^4} \quad (3.10)$$

ここで ω_0 は出射光のビームウエストであり、 T と M_0^2 は

$$T = \pi^2 \int_0^\infty k^3 \Phi(k) dk \quad (3.11)$$

$$M_0^2 = \frac{\pi}{\lambda} w \phi \quad (3.12)$$

である。ここで、 w はMMFに入射する直前のレーザ光のビームウエスト、 ϕ は入射角である。 $\Phi(k)$ は大気の乱流による屈折率の空間パワースペクトラムであり、Tatarskiiによるスペクトラムを用いると、式(3.11)は

$$T = 7.6113 C n^2 \quad (3.13)$$

と求められる。

大気ゆらぎの影響を考慮した水平伝搬後のMMFへのカップリング効率を M^2/M_F^2 を横軸に図3-13に示す。ファイバのNA、またはコア径が大きくなるほどファイバ内を伝搬できる光が増えるためカップリング効率が高くなり、大気ゆらぎの影響が強い場合では C_n^2 を含む M^2 の値が大きくなるのでカップリング効率が低下していることが分かる。

図3-12から、 M^2/M_F^2 の値が低くなるとカップリング効率の値が1になる場合があると分かる。式(3.8)では光ファイバの端面反射や吸収といった損失は考慮されていないため、大気ゆらぎの影響が少ない環境では理想的なカップリング効率の値が得られる。しかし、実際の空間光通実験では上記の理由から損失がまったくない状況は考えにくい。3.1.3節で述べたように、Geドープの石英ファイバの吸収による減衰は1 km 辺り 1 dB 以下である。本実験ではMMFを数 m から十数 m で利用することを考えているため、吸収損失は無視する。一方、光ファイバの端面反射は角度によっては入射端面、出射端面合わせて10 %を超える場合、

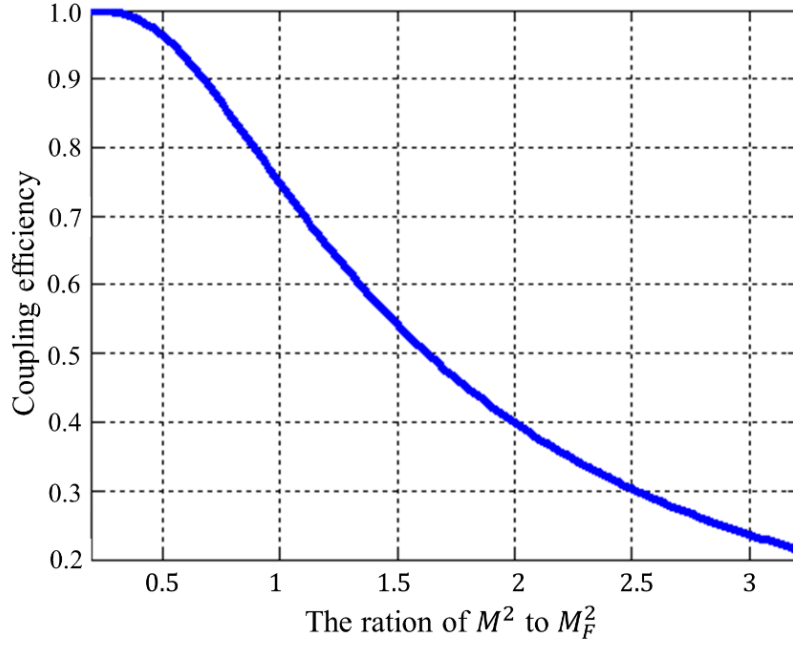


図 3-13 M^2/M_F^2 に対するカップリング効率の変化

がある。そのため、式(3.8)に光ファイバへの端面反射の項を加え

$$\eta' = \alpha \times \eta \quad (3.14)$$

$$\alpha = (1 - R_1) \times (1 - R_2) \quad (3.15)$$

と書き換える。 R_1 と R_2 はそれぞれ空気からシリカ、シリカから空気へ伝搬したときの反射損失を表し、フレネル損失から計算している [21]。以上から、式(3.15)を用いてカップリング効率のシミュレーションを行った。このシミュレーションは第 4 章で説明する空間光通信実験に用いた受信光学系を参考にパラメータを設定している。設定したパラメータを表 3-1 に示す。図 3-13 では、 $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-15}$ とし、通信距離を変化させたときのコア径の異なる MMF へのカップリング効率をシミュレーションした。設定した $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-15}$ という値は電通大-NICT 間において比較的大気ゆらぎの値と言える。シミュレーション結果から、コア径が 600

μm の時、10 km 間でどの距離においてもカップリング効率にほとんど変化がないが、他の光ファイバでは通信距離に反比例するようにカップリング効率が低下している事が分かる。次に、同じ設定値で $L = 7.8 \text{ km}$ として C_n^2 を変化させたときのシミュレーション結果を図 3-15 に示す。伝搬距離 7.8 km という値は電通大-NICT 間の通信距離であり。シミュレーション結果から、 $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-16}$ 以下ではどのコア径の光ファイバでもカップリング効率は安定して一定の値になることが分かる。一方、 $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-12}$ 付近の大気の状態になるとほとんどの光ファイバのカップリング効率が 0 に近づくことが分かる。シミュレーションの結果からコア径が大きくなるほどカップリング効率は高くなる傾向がわかるが、ファイバと繋ぐ受信機のセンサの大きさは通信速度および受信感度に反比例する。センサの大きさよりも大きいコア径のファイバではセンサからはみ出た部分が損失になるため、一般的にセンサよりも小さなコア径の光ファイバを使用する。つまり、使用する MMF のコア径はセンサの大きさに合わせて選択する。

表 3-1 ファイバおよび受信光学系のパラメータ

コア径 (μm)	NA
50	0.22
100	0.22
200	0.37
600	0.37

波長	1.55 μm
ビームウエスト(入射端面)	149 μm
開口径	100 mm

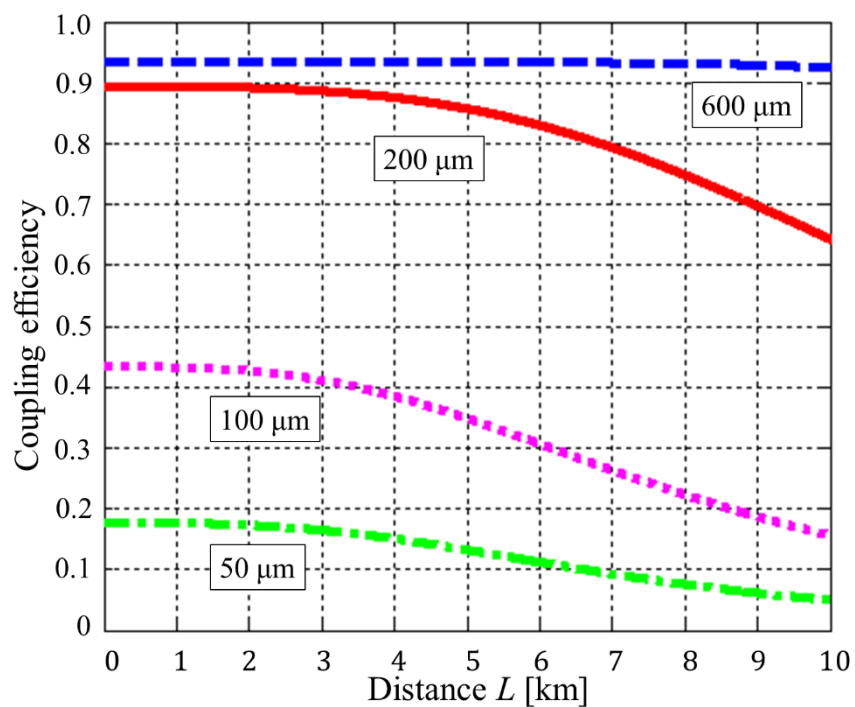


図 3-14 通信距離に対するカップリング効率変化

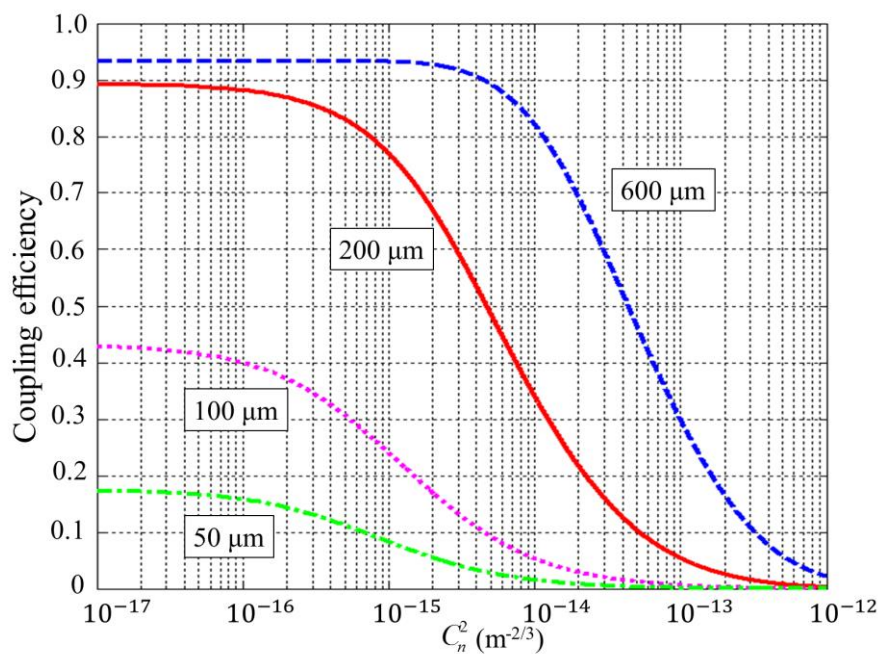


図 3-15 C_n^2 の変化に対するカップリング効率

3.4 MMF によるデータ伝送速度の制限

マルチモードファイバを用いる場合、入射したレーザ光が伝搬時間の異なる複数のモードに分かれてファイバ内を伝搬するためモード分散が生じる [25]。この現象により、各モードを合成した出射光はパルス幅が時間的に広がったものになるため、送信する信号光の隣接パルス間隔が小さいとき、符号誤りが起こる。信号光の隣接パルスをあまり小さく出来ないということは、伝送帯域が制限されてしまうということになる。

ここで、MMF として、コアの屈折率 n_1 、クラッドの屈折率が n_2 のステップインデックス型を仮定すると、信号光の伝搬成分の時間的な広がり Δt は、

$$\Delta t = (n_1 - n_2)L_f / c \approx \frac{NA^2 L_f}{2n_1 c} \quad (3.16)$$

となる [26]。ここで、 L_f は信号の伝搬距離、 c は真空中の光速である。MMF が許容するデータ伝送の帯域幅は $1/\Delta t$ で求められる。 $NA = 0.37$ 、 $n_1 = 1.45$ と仮定し、MMF を利用した場合に許容される帯域幅を図 3-15 へ示す。MMF に伝送可能な帯域幅は距離に反比例する。図 3-16 から、例えばコア径 $600 \mu\text{m}$ 、 $NA 0.37$ の MMF を空間光通信の簡易化に利用する際、 5 m の長さでは 1.27 GHz が上限となる。

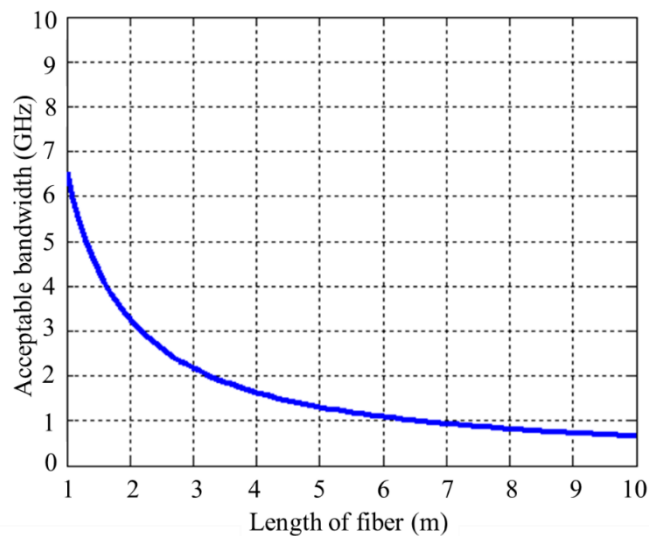


図 3-16 MMF における伝搬距離に対する伝送可能な帯域幅

第4章 電通大-NICT 間空間光通信実験

4.1 実験概要

実際にファイバ直接結合型の空間光通信システムの送受信装置を地上ビル間に設置し、大気ゆらぎの影響に対する MMF へのカップリング効率を測定する。図 4-1 に実際に実験を行った場所の地図を示す。今回の実験では送信光学系を電気通信大学東 6 号館の屋上にあるドーム内に設置し、受信光学系を NICT3 号館 6 階に設置した。図 4-2 に東 6 号館屋上に設置したドームとドーム内から NICT の方向を見たときの風景を示す。電通大・NICT 間にレーザ光を遮断する障害物がないことが確認できる。通信距離は約 7.8 km でレーザ光の波長は $1.5\ \mu\text{m}$ のものを使用した。先行研究および市販されている空間光通信システムでは通信距離が 1 km であったことから本実験の通信距離は比較的長く、都心部であることから大気ゆらぎの影響は郊外に比べ大きいと考えられる [27]。



図 4-1 通信実験を行ったフィールド

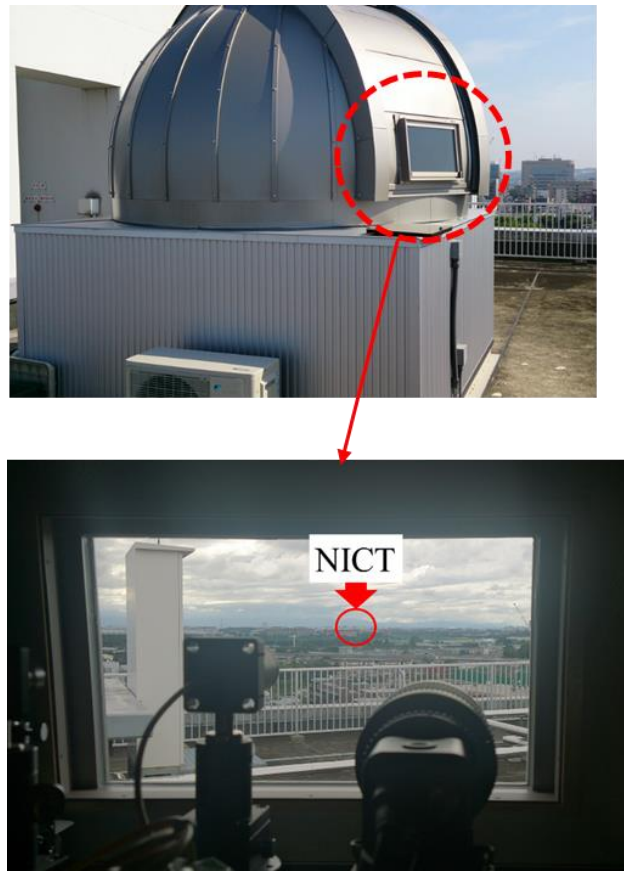


図 4-2 上:電通大屋上に設置したドーム 下:ドーム窓から見たレーザ光の伝送路

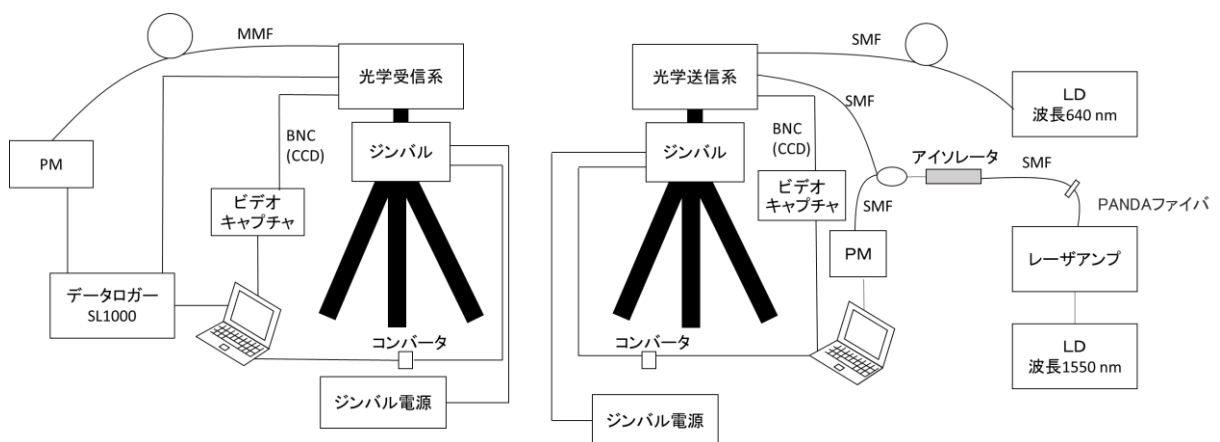


図 4-3 実験システムの構成概要

図 4-3 に実験システムの構成概要を示す。光学送受信系はどちらもジンバルが取り付けられた三脚の上に設置され、PC によってジンバルの Az、El 方向は 1/1000 deg の精度で調整ができる。送信側では光源となる波長 1550 nm の LD がファイバンプによって増幅され SMF を経由し、送信光学系に取り付けられているコリメータから出射され受信側に送信される。その際、光源のレーザ光の安定性をモニターするために 1 対 99 に分岐するファイバカップラをコリメータ前の SMF に接続し、分岐したレーザ光をパワーメーター (PM) で測定している。

また、受信側では送信光を受信光学系で受信し PM にて受信強度を測定し、アナログ出力から出る電圧値の変動をデータロガー (SL1000) にて計測している。また、本実験の目的は MMF へのカップリング効率の測定であるため送信光は無変調連続波 (CW) で送信しているが、レーザ光を変調しデータの送信を行うことも可能である。

4.2 送受信光学系

図 4-4 に受信側の実験システムの設置状況、受信光学系の写真、そして図 4-5 にその構造の概略をそれぞれ示す。また表 4-1 に送受信光学系の詳細をまとめる。受信光学系には送信側から伝搬したレーザ光を受信するミラーレンズとレーザ光を画像で確認できるよう

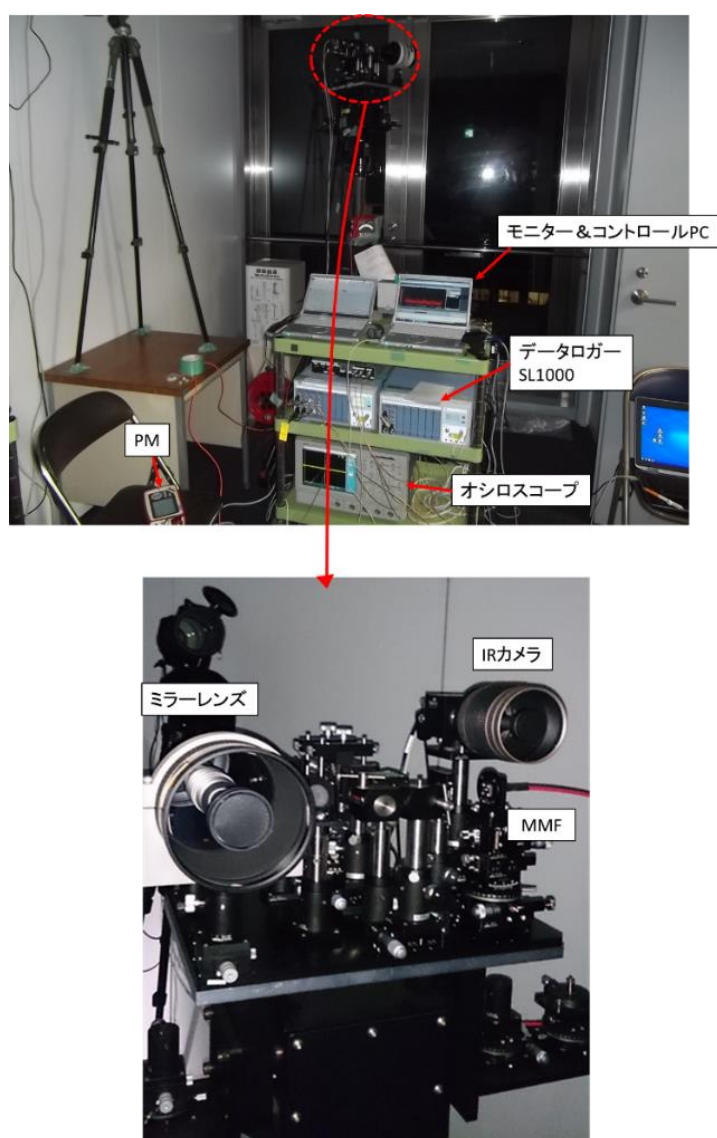


図 4-4 NICT 側実験装置構成と受信光学系の写真

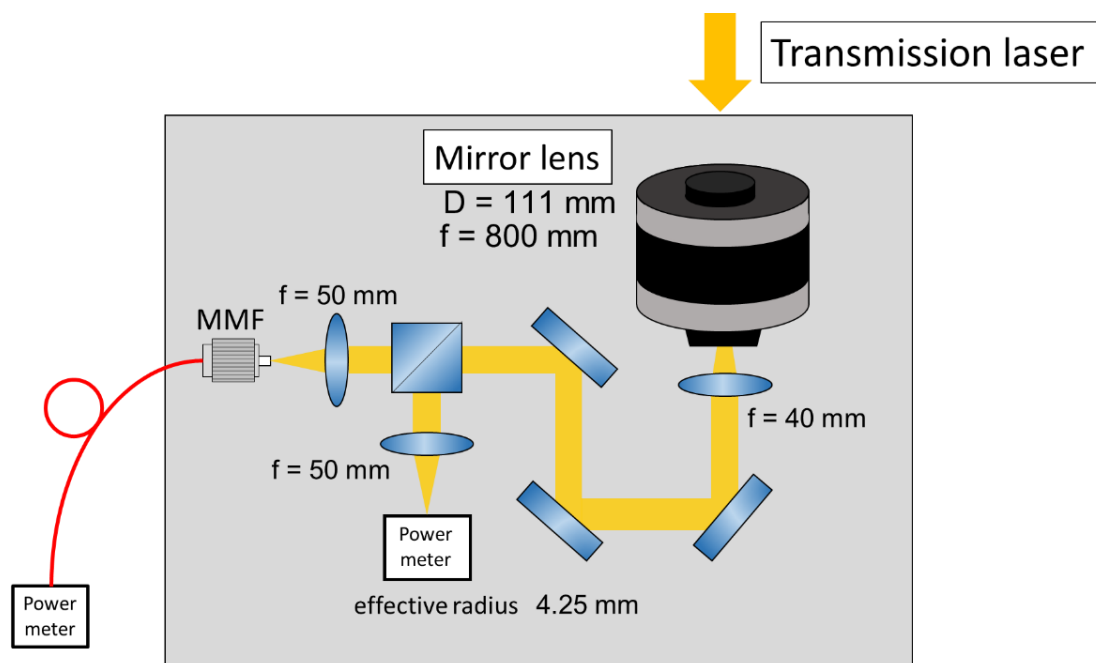


図 4-5 受信光学系

表 4-1 受信光学系の仕様

受信光学系	
ミラーレンズの開口径	100 mm
ミラーレンズの焦点距離	800 mm
PD の有効径	2 mm
通信距離	7.8 km
送信光学系	
通信波長	1.550 nm
広がり角	0.2 mrad

IR カメラが設置され PC からモニターできるようになっている。電通大-NICT 間で光リンクが確立できる前の段階では、視野の広い IR カメラを見ながら送受信側のジンバルをお互いに振って調整する。ミラーレンズから光学系内部に伝搬したレーザ光はビームスプリッタによって二つに分岐される。分岐された一方のレーザ光は有効直径 4.25mm のセンサが取り付けられた PM に伝搬し、もう一方は集光され MMF にカップリングする。MMF 内を伝搬したレーザ光は同様にセンサが取り付けられた PM に伝搬し、アナログ出力から電気信号をデータロガーで測定し大気ゆらぎによる強度変動を計算する。そして、二つの PM の強度の割合をカップリング効率として計算する。このとき、ビームスプリッ

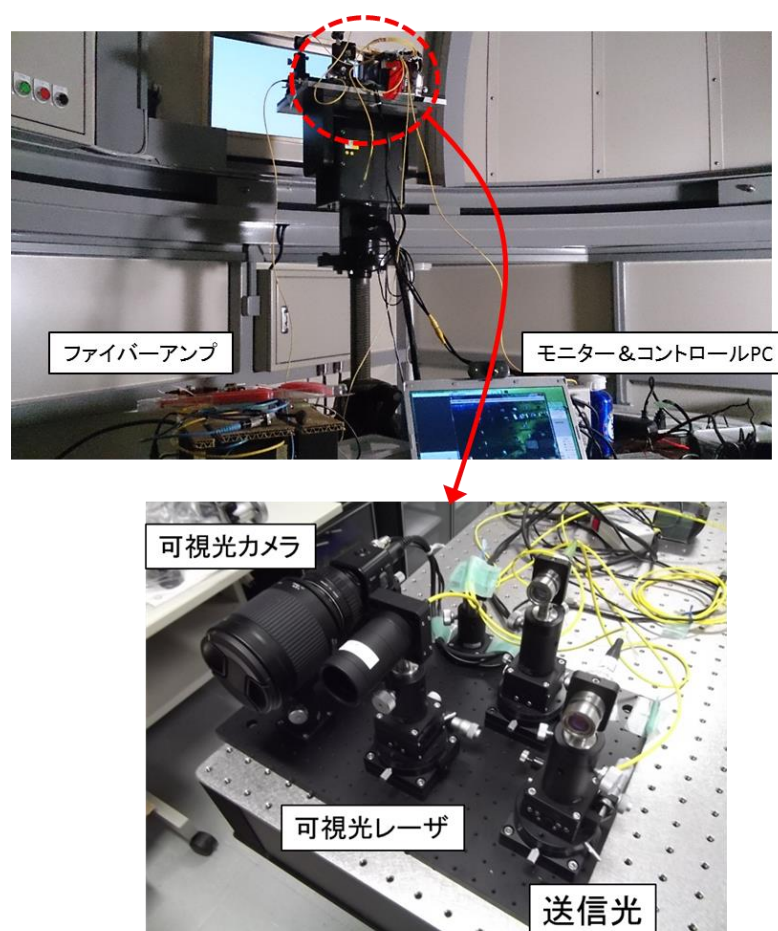


図 4-6 ドーム内実験装置と送信光学系の写真

タによる分岐比の誤差は事前に実験室にて計測し、カップリング効率を計算する際に補正している。図 4-6 にドーム内部の様子と送信光学系の写真を示す。送信光学系には 0.2、1.0 mrad の広がり角に設定したコリメータが SMF とつながっている。広がり角の小さいコリメータから出射したレーザ光の方が受信面でのビーム広がり小さくなるが受信するレーザ光の強度が上がるため、本実験では 0.2 mrad のコリメータを使用し実験を行った。

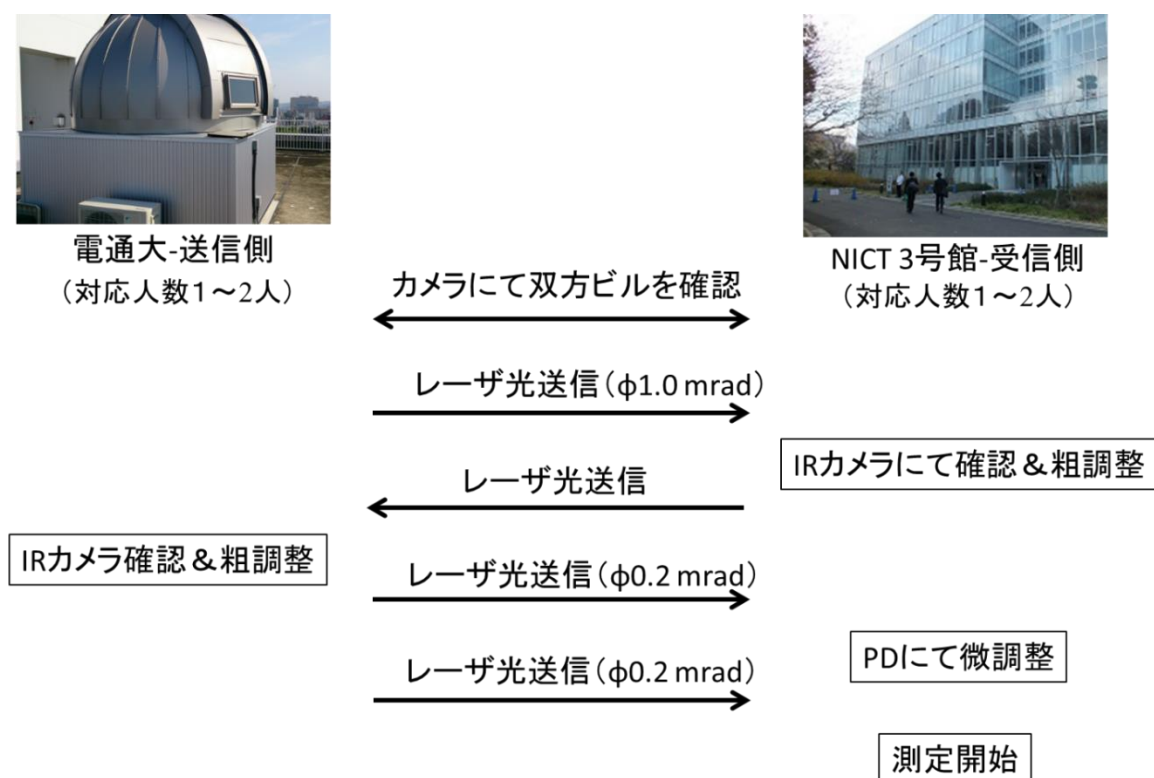


図 4-7 実験手順

図 4-7 に実験の際の手順を示す。実験時は基本的に送受信側双方 1~2 人で対応し、システムの操作を行う。双方リンクが確立する前はカメラにてお互いの位置を視認し、ジンバルの向きを調整する。その後、送信側からレーザ光を出射し受信側の IR カメラで確認する。IR カメラによる粗調整はモニターに映る送信光の輝度を目視で確認しながらジンバルを振り、最も強く光る方向を探して調整を行う。受信側からもレーザ光を出射し同様の作業を行い粗調整を行う。受信側は接続され

ているMMFにレーザ光を接続しミラーレンズからレーザ光を出射する。その後、送信側のコリメータを $0.2\ \mu\text{m}$ のものにファイバを繋ぎ変えレーザ光を送信する。受信側では有効径 $4.25\ \mu\text{m}$ のPDで受信強度を確認しながら微調整を行い、測定を開始する。測定に関して、雨天時はレーザ光が雨で減衰してしまう他、送信側のドーム窓及び受信側のガラスに水滴がついてしまい受信光が大きく減衰してしまう。また、調整は基本的に大気ゆらぎの弱い夜の時間に行うことが望ましい。夕方の時間にカメラにてお互いを視認出来た後、強度変動の比較的少ない夜の時間にジンバルの調整を行った。

4.3 実験結果

4.3.1 電通大-NICT間の大気ゆらぎ変動

電通大-NICT間の大気ゆらぎの変動を測定した結果を紹介する。2014年7月の

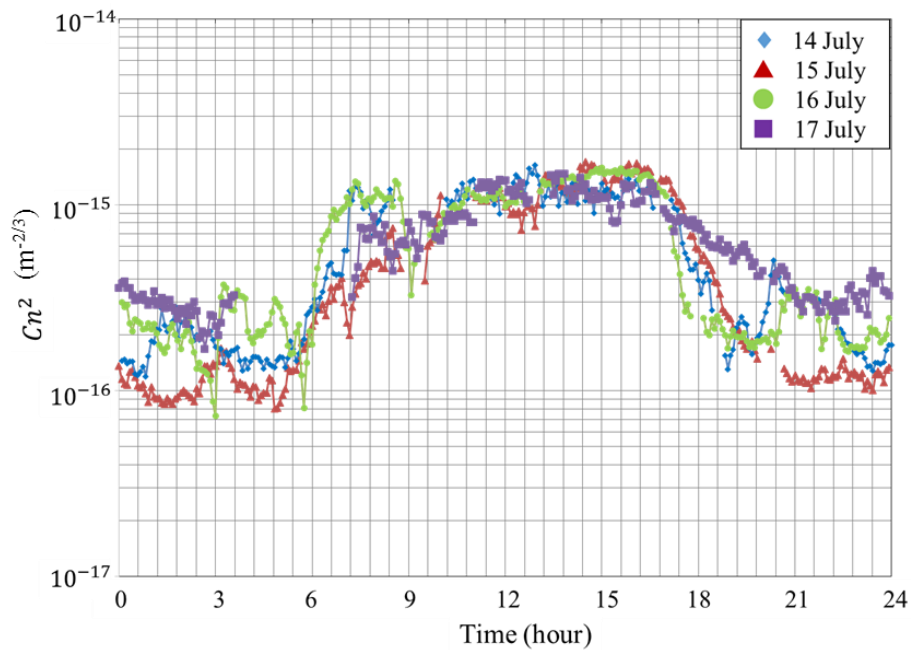


図 4-8 一日の C_n^2 の変化

表 4-2 測定日の気象情報

Data	Temperature (°C)		Wind speed (m/s)	Hours of sunlight (h)	Cn^2	
	High	Low			High	Low
14 July 2014	33.7	22.5	1.5	4.8	1.63×10^{-15}	1.00×10^{-16}
15 July 2014	32.4	23.8	2.2	7.0	1.71×10^{-15}	8.03×10^{-17}
16 July 2014	33.5	23.3	1.8	9.8	1.58×10^{-15}	7.30×10^{-17}
17 July 2014	31.4	24.2	2.2	4.3	1.48×10^{-15}	1.68×10^{-16}

晴れた日に測定した強度変動のデータから式(3.7)を用いて C_n^2 を計算し、一日の変化を図 4-8 に表した。測定データのサンプリング数は 20 kHz であり、計算した C_n^2 を 5 分間ごとに平均してプロットしている。また、図 4-8 に示した日程の一日の気象情報を表 4-2 に示す。一般的に、 C_n^2 の値は夜の時間帯よりも昼間の時間の方が高い値となる [14]。今回の電通大・NICT 間での測定結果からも朝から昼間にかけて C_n^2 の値が上がっていき、夕方から夜にかけて値が下がっていく様子が確認できた。一方、 C_n^2 の値は主に雨の日や曇りの日よりも晴れた日の方が高く、都心部よりも郊外や田舎の方が低くなる傾向がある [27]。これらのことから、都内に位置する電通大と NICT の間で晴れた日に測定されたデータは比較的大気ゆらぎの大きな環境であるといえる。受信光学系に取り付けた IR カメラから、 C_n^2 の値が高い昼間と値の低い夜間で送られてくるレーザ光の変化を図 4-9 に示す。図は昼間 12 時 52 分から撮影したものと同日の夜間 19 時 30 分に撮影したものである。それぞれ、1 秒間隔で撮影したものを 5 秒間分示している。送信光の左側に直線状に反射光のようなものが写っている。これは受装置が置いてある場所に取り付けられている手すりか窓ガラスの淵に反射して写っている反射光だと考えられる。夜間では IR カメラに写る受信光がほぼ同じ大きさで、写る円の周りがちらつく程度

である。昼間では受信光の大きさが変化し夜間に比べて大気のゆらぎが大きいことが目で見て分かる。

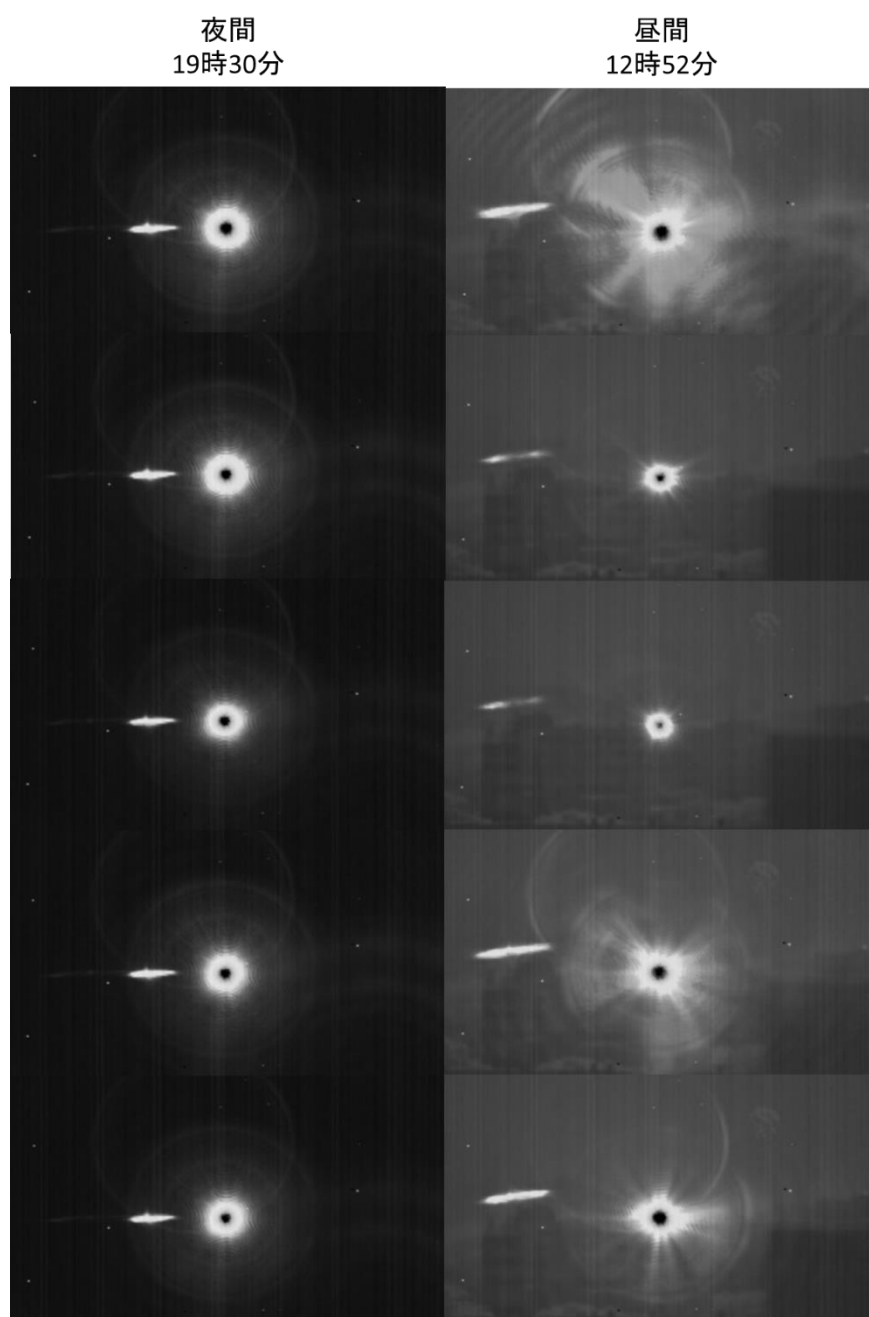


図 4-9 IR カメラによる受信光の輝度変動

4.3.2 電通大-NICT 間のカップリング効率

実験結果を図 4-10 に示す。図のグラフはそれぞれコア径 $600\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ の MMF を使用したときのカップリング効率を Cn^2 の変化を横軸にして表している。どちら

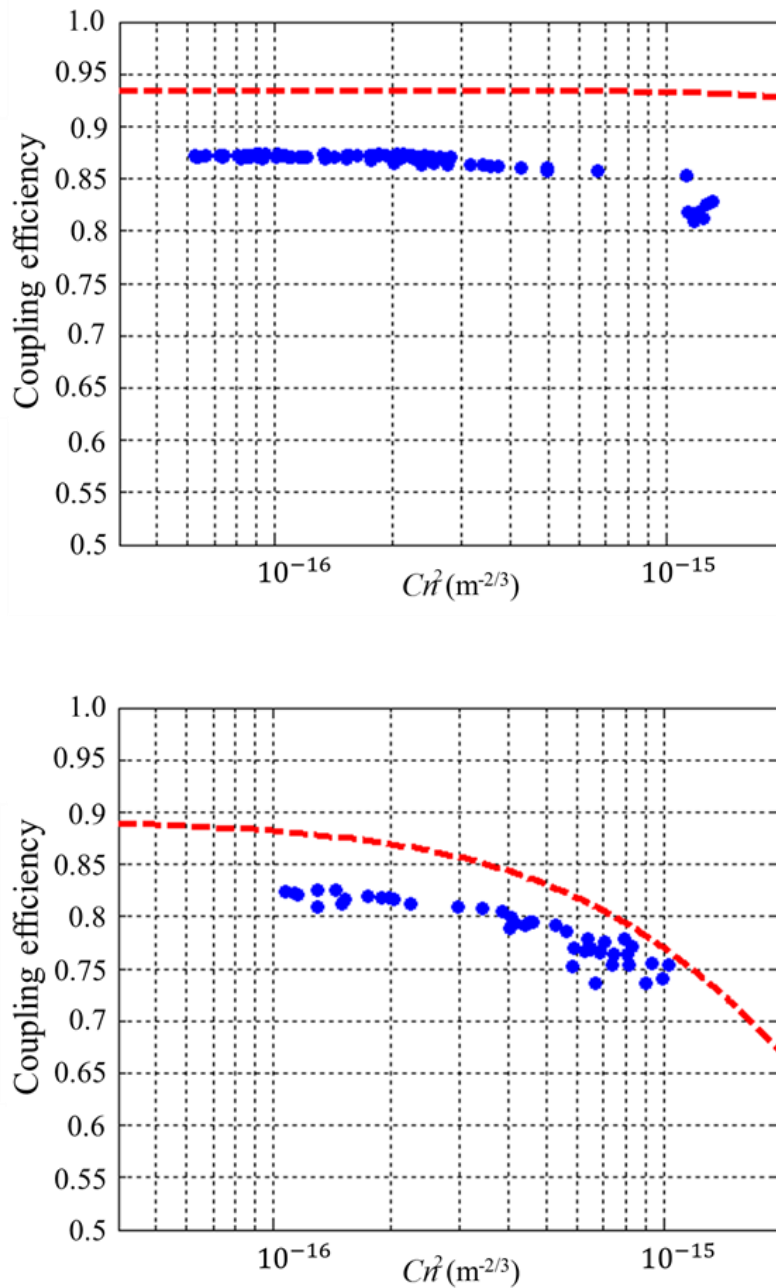


図 4-10 MMF へのレーザ光のカップリング効率
(コア径 上 : $600\ \mu\text{m}$ 下 : $200\ \mu\text{m}$)

の MMF も NA は 0.37 である。今回の実験では、前節で述べた C_n^2 の一日変化から分かるように C_n^2 の値は最大 $6 \times 10^{-17} \sim 1 \times 10^{-15}$ の幅でしか変化しないことがわかっている。そのため、カップリング測定はこの大気ゆらぎの変化の中で評価することになる。カップリング効率の測定は C_n^2 の変化が大きい夕方に行い、どちらも測定時間は約 3 時間である。図の点線は前章で述べたカップリング効率理論を本実験の送受信光学系のパラメータをもとに表している。また、実験で得られたカップリング効率はドットで表し、サンプリングレート 20 kHz の測定データを平均化し 1 ドット 5 分で表している。

コア径 200 μm の MMF の場合、カップリング効率の最大値は 83 %、最小値は 73 % である。カップリング効率の理論値は C_n^2 が 10^{-16} を下回ってから減衰していくが、実測値も理論値と同様の傾向を示していることがわかる。コア径 600 μm の MMF の場合、カップリング効率の最大値は 87.5 %、最小値は 81 % となった。 C_n^2 の値が $6 \times 10^{-17} \sim 3 \times 10^{-16}$ にかけて実測値も理論値もほぼ一定であることが分かる。実験結果からコア径 600 μm の MMF を利用した場合、最大 -0.9 dBm の減衰が、200 μm の MMF では最大 -1.3 dBm の減衰が起こる事が確認できた。これは SMF 結合に比べれば非常に小さな損失であり、簡易化に MMF の利用が有用であると考えられる。また、今回の実験ではそれぞれの MMF において理論値を基準とした場合、コア径 200 μm の MMF で最大約 8 %、コア径 600 μm の MMF で最大約 11 % のエラーであることが確認できる。実験結果から、電通大-NICT 間の環境で新しく提案した大気伝搬後の MMF へのレーザ光のカップリング効率理論は約 11 % の誤差以下でカップリング効率を予測する事が出来ると考えられる。カップリング効率理論は幾何光学的観点から求めたカップリング効率理論を基にしているため、簡易的な式からカップリング効率を予測できるメリットがある。今回、実測値と理論値の間に生じたエラーは各伝搬モード毎に計算していないという点や、ビームスプリッタで分岐した後の光学系による損失等が要因ではないかと推測できる。

第5章 衛星-地上間光通信実験におけるマルチモードファイバの適用

5.1 衛星光通信における地上局の簡易化について

前章まで空間光通信における簡易化について主に地上ビル間での通信を中心に述べてきたが、ファイバ直接結合型の空間光通信システムを衛星通信における地上局の簡易化にも適用させる。図 5-1 に光ファイバを用いた光地上局の簡易化のイメージを表す。図に示されている望遠鏡は東京都小金井市にある NICT 光地上局内に設置されている口径 1.5 m の多焦点ポートをもつ光学望遠鏡である。この望遠鏡は 4 つの焦点を有し、副鏡の交換とポート選択ミラーの回転機構により、

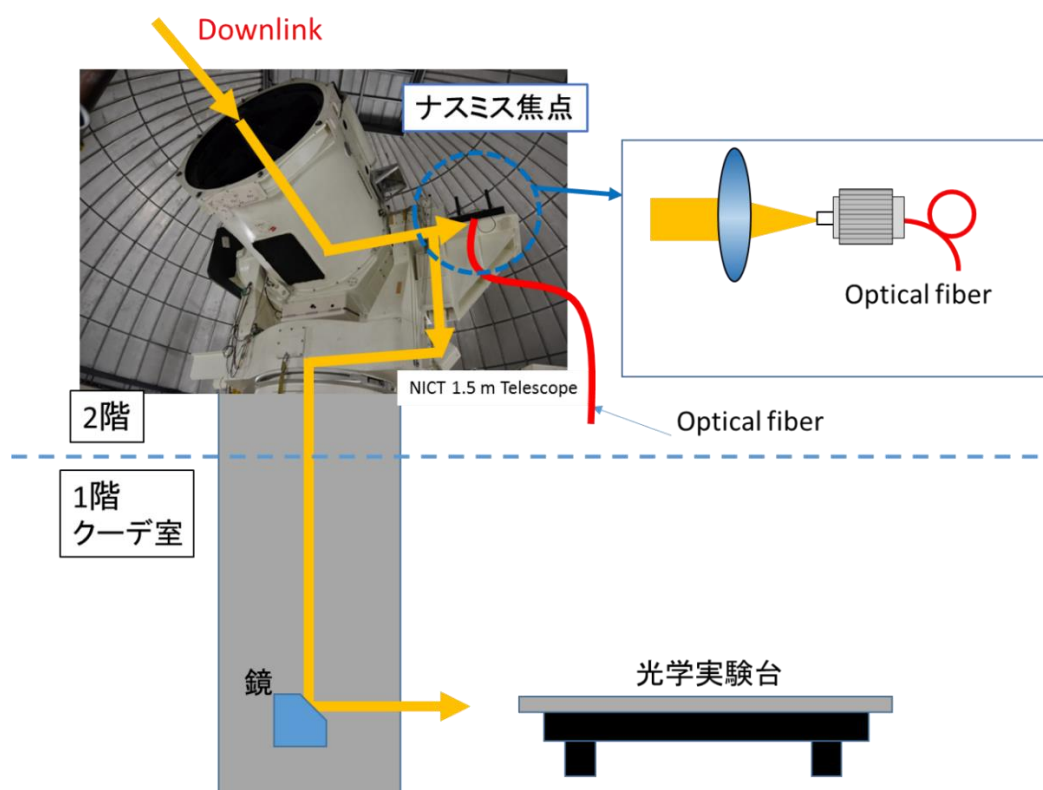


図 5-1 光ファイバを用いた光地上局簡易化のイメージ

各焦点および焦点から分岐した計約 10 ポートを切り替えが可能で、これらのポートにレーザ送受信ができる設備や各種カメラを置き多目的の実験を行うことができる。先行研究として、第 1 章で述べた OICETS と NICT 宇宙光通信地上センサーとの地上-衛星間光通信実験では一部の実験で受信系をクーデ焦点に構築していた [28]。クーデ焦点は望遠鏡の設置されている階の下にあり、望遠鏡の姿勢が変わっても装置の姿勢が変わらない点や、光学系を外気に晒すことなく構築できるといった利点がある。しかし、クーデ室の光学実験台までダウンリンク光を伝搬させるためには主鏡、副鏡を通った光を図のように 5 枚のミラーに反射させる必要がある。ミラーは外気に晒された状態になるため、高湿度や結露、ほこり等が原因となり時間とともに反射率が徐々に劣化してしまう。特に上向きのミラーの劣化スピードは速く、定期的なメンテナンスが必要になり、当望遠鏡はこれまで 1～3 年に 1 度メンテナンスを実施している。仮にひとつのミラーの反射率が 85 %に落ちた場合、光学実験台までにダウンリンクが 44 %に減衰してしまうことになる。

一方、本章で説明する小型衛星搭載用超小型光通信機器 (SOTA) を搭載した小型衛星と光地上局との通信実験では、光学受信装置をナスミス焦点に設置している。ナスミス焦点は図のように望遠鏡側面に位置し、光軸を高度軸と一致させて像を結ばせるためこちらも望遠鏡の姿勢が変わっても装置の姿勢を変える必要がない。また、クーデ焦点に比べ副鏡から斜鏡を経て直ぐに光学系に伝搬するためミラーによる反射回数が少なく反射損失を軽減できる利点がある。しかし、受信光学系を望遠鏡側面に設置するため、光学系が外気に晒されてしまう点や、スペースの問題からナスミス台に乗せられる光学系の大きさや重さが制限されてしまう。さらに、設置場所が高いため光学系の設置や調整に手間がかかることや、装置に電力供給をするため電源を確保しなくてはならないといった問題もある。

簡易化の観点から、電源確保の必要がなく装置の調整や設置が容易に行える構成が望ましい。これらの問題を解決するため、図のようにナスミス台に直接 MMF

を設置しダウンリンクを直接ファイバ内に結合させる方法を考える。ファイバに直接結合することでナスミス台に受信装置を設置する必要がなくなり重量やスペースの問題を解決できる。また、光ファイバに電力供給は必要ないため電源確保も不要になる。現在、天文台をはじめ多くの望遠鏡が存在しており、それら既存の施設を光通信に利用することが出来れば、サイトダイバーシチの効果を向上させる事が出来る。そのためには既存の望遠鏡に光通信の機能を備えることが必要となり、MMF を利用する事で機材の調整、設置ペースに対して柔軟な対応が取れるようになる。本節では 2015 年 5 月に打ち上げられた小型衛星に搭載されている小型光通信装置 SOTA と NICT 光地上局との衛星-地上間光通信実験から得られたデータを基に MMF を用いた光地上局の簡易化について検討する。具体的には、SOTA から送られてきたダウンリンク光の強度変動を地上局側で計測し、計算された大気ゆらぎから MMF へのダウンリンク光のカップリング効率を計算する。

5.2 実験構成

5.2.1 実験システム概要

SOTA を用いた衛星-地上間光通信実験の全体構成を図 5-2 に示す。衛星-運用局間では RF（無線周波数）で双方通信を行い、光地上局-運用局間は地上のネットワーク、衛星-光地上局間はお互いレーザ光にて通信を行う [29]。まず、光地上局側で実験計画を立案し、パラメータを衛星運営局側から SOTA 側に送信する。同時に衛星側から軌道情報を取得し、そこから計算した軌道予測値を光地上局側に伝え、光地上局側で望遠鏡の姿勢を衛星軌道にあわせて準備させる。そして、SOTA の軌道が望遠鏡の視野内に入り始める頃に光地上局側から SOTA に向けてビーコン光を出射する。ビーコン光は衛星側に光地上局の方向を示すために出射されるレーザ光であり、本実験では Yb 添加ファイバアンプによる高出力ファイバレーザを

望遠鏡側面にて1本×20 W、4本×5 Wで出力している。また、マルチビームによる大気ゆらぎの低減の効果も確認するため複数のビーコン光を用いている。これは複数のレーザをコヒーレント長よりも間隔をあけて設置し平行に出射することで、受信側で得られる電力を平均化する方法である [30]。これにより受信電力の変動を抑えることが期待される。光地上局からのビーコン光を受信した SOTA はビーコン光の方向に向けて、レーザ光を送信する。SOTA から送られたレーザ光を光地上局の望遠鏡が軌道予測をもとに受信しながら追跡し、予定時刻になると望遠鏡の視野から SOTA が外れ、実験終了となる。その後、SOTA 側で得られたデータはテレメトリにて衛星運営局から光地上局に送られる。

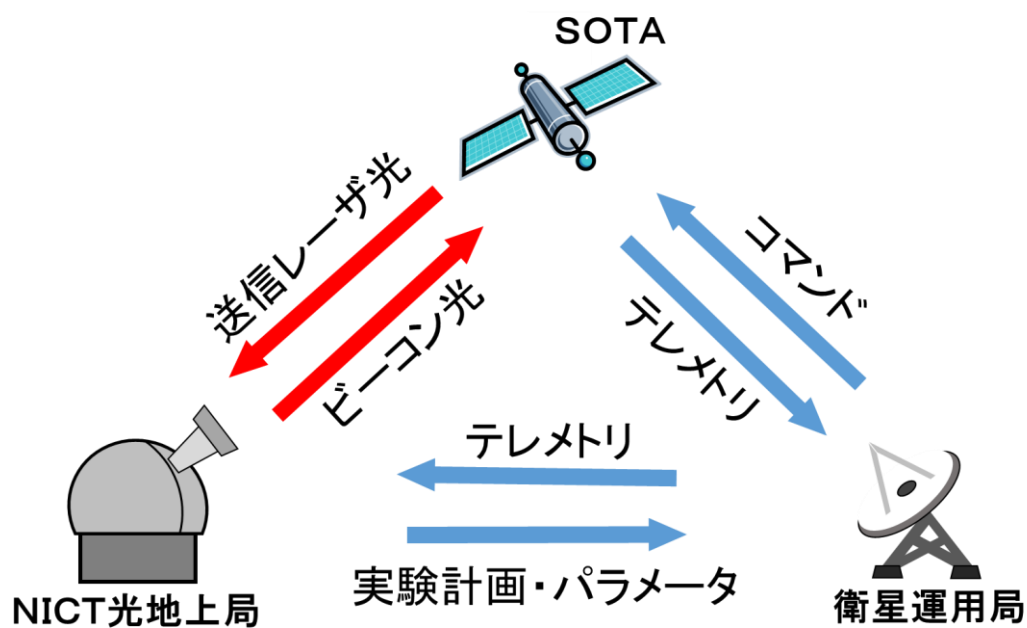


図 5-2 SOTA を用いた衛星-地上間光通信実験の全体構成

5.2.2 超小型光通信機器 (SOTA)

SOTA は超小型衛星ミッションに対応できるよう設計された光通信ターミナルであり、株式会社エイ・イー・エス (AES) が開発した 50 kg 級の超小型衛星 SOCRATES (Space Optical Communication Research Advanced Technology Satellite) に搭載されている [31]。2014 年 5 月 24 日に H-IIA ロケット 24 号機の小型副衛星 (ピギーバック衛星) として高度 650 km の太陽同期軌道に投入された。図 5-3 に衛星に取り付けられる SOTA と同程度のスペックで作られた SOTA シミュレータの写真を示す。指向捕捉制御は、光地上局から送られてきたビーコン光を捕足センサ (Tracking QD) で受信し光学系全体の姿勢を Az、El 方向にジンバル駆動で制御する粗捕捉制御と精追尾センサ (Fine QD) による精追尾システム

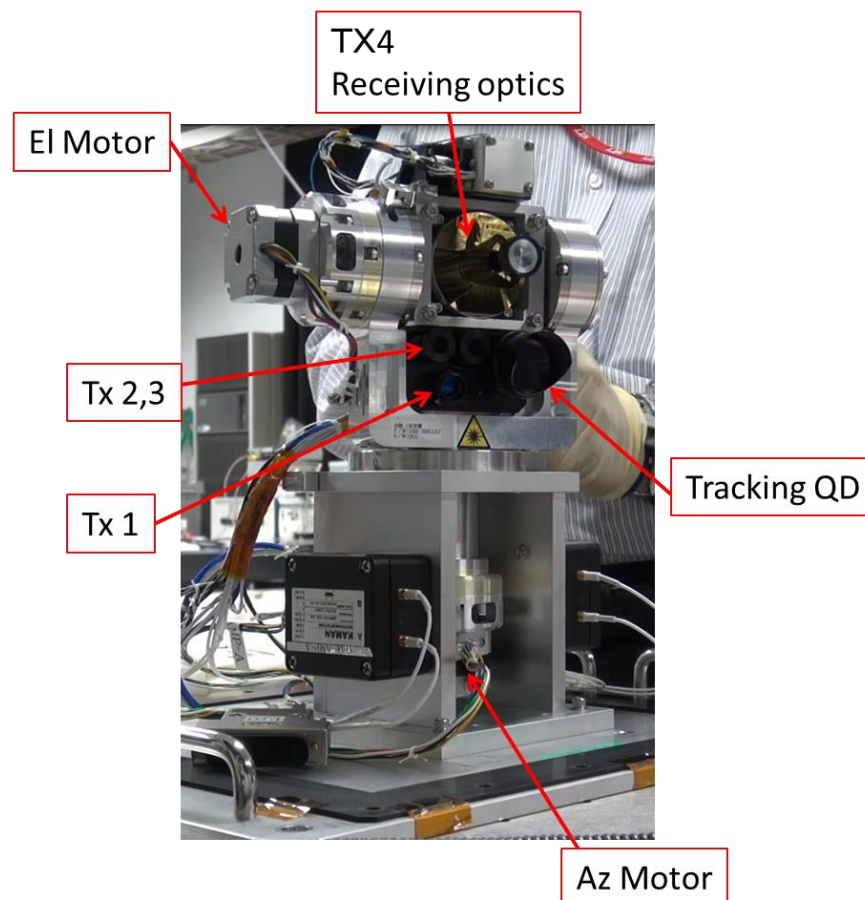


図 5-3 SOTA シミュレータ外観

Wavelength	Tx1	980	nm
	Tx2,3	800帯	nm
	Tx4	1550	nm
	RX	1064	nm
Data rate		1 or 10	Mbps
RX antenna diameter		5	cm
Error correction		RS/LDGM	

表 5-1 SOTA 仕様

(FPS) を駆動させる精追尾機構がある [32]。SOTA には Tx1 から Tx4 までの 4 つの送信用レーザが搭載されており、様々な実験目的に応じてそれらを使い分けることが出来る。表に SOTA の送受信機の機能をまとめる。

5.2.2 光地上局システム

今回の実験で用いた望遠鏡の写真を図に示す。望遠鏡は NICT 小金井本部の敷地内の光地上局に設置されている。望遠鏡格納建物の外観と望遠鏡本体の写真を図に示す。



図 5-4 1.0 m 望遠鏡格納建物外観



図 5-5 1.0 m 望遠鏡本体外観

この望遠鏡は開口直径 1.0 m のカセグレン式反射望遠鏡であり受信光学系はナスミス焦点に設置されている。1.0 m 望遠鏡は 2014 年に新しく設置され、SOTA との通信実験では 1.5 m と 1.0 m 望遠鏡の双方を稼働させ実験を行っている。口径比は F12 である。追尾性能は低軌道衛星については 10 秒角以下、恒星については高度 15～30 度に範囲で 1.0 秒角、30 度以上の範囲で 0.4 秒角である。

図にナスミス焦点に設置した地上受信光学系の写真と構成を表した概略図を示す。

衛星から送信されたレーザ光ははじめに縮小光学系内でビーム径約数 mm に縮小され、その後 BS でそれぞれの機器に分配される。最初のビームスプリッタ (BS) で分岐したレーザ光は MMF に結合され、ファイバカップラで SOTA 受信機とアバランシヤ・フォトダイオード (APD) にそれぞれ分岐される。復号器は SOTA から送信されたデータを復号し、通信品質を計測するほか符号化パラメータの評

価を行う。APD に結合されたオシロスコープでは伝搬した信号の波形の観測し、PM ではレーザ光の強度変動をデータロガーで計測する。そして、IR カメラで受信光のゆらぎを画像として確認する。

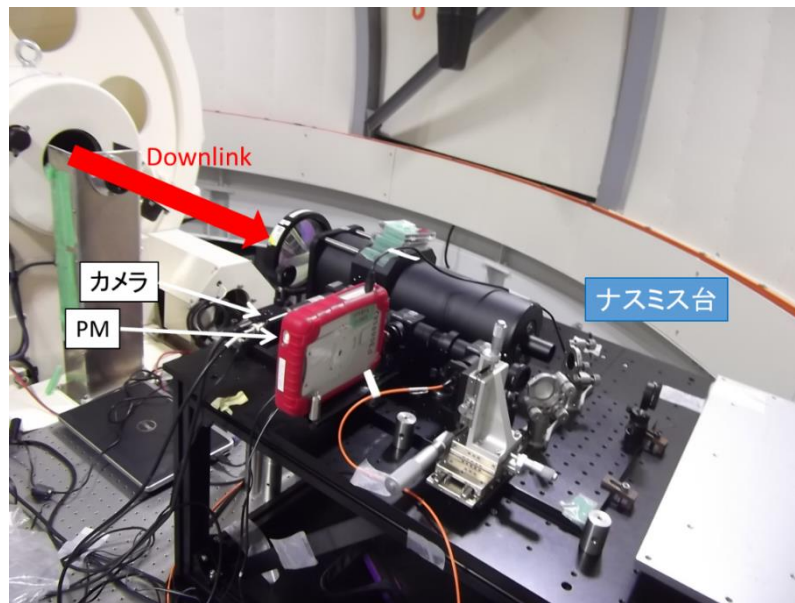


図 5-6 1.0 m 望遠鏡ナスミス台の光学受信系

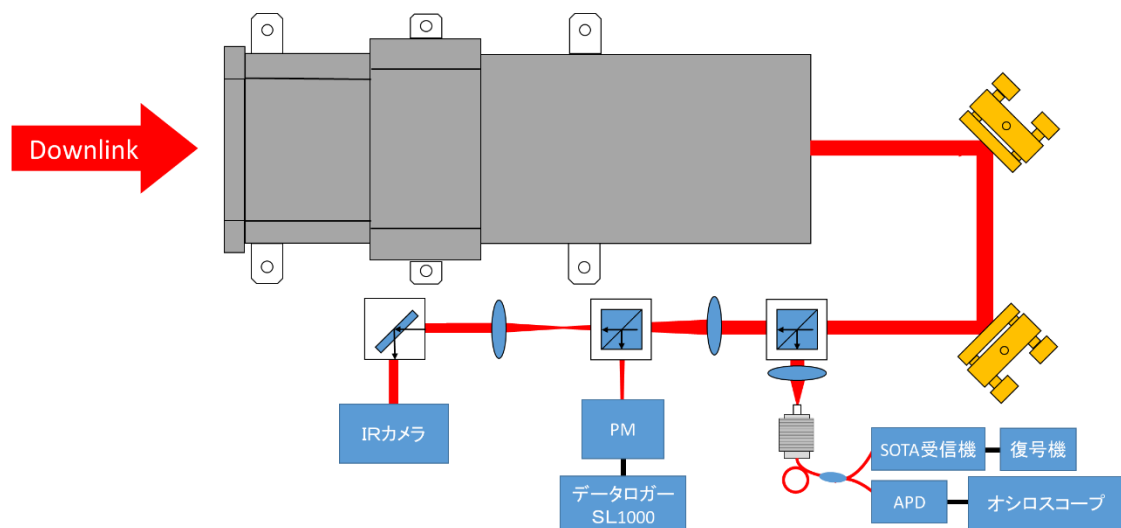


図 5-7 1.0 m 望遠鏡ナスミス台の光学受信系システム概要

5.3 実験結果

衛星は 6 月下旬から立ち上げ運用を開始し初期チェックアウトを終えた後、各実験を随時行う予定であった [31]。月に 12 回前後の実験日の中、8 月から 9 月にかけては天候に恵まれず衛星から送られる Downlink 光を前節で述べたナスミスタの PM で確認できないことが多くあった。先行研究である OICETS との衛星-地上局光通信においても 8、9 月は天候不良による実験中止が多々あった。両実験を比べると雨季と重なる 8、9 月より冬の 11、12 月の方が成功率は高いと考えられる。また、曇りの日でも雲と雲の隙間をレーザ光が突き抜けることがあったが、雲による伝搬損失が大きく受光レベルは大きく下がってしまう。

図 5-8 に、12 月現在で最も長時間受光パワーの測定に成功した日のデータを示す。赤、緑、青線はそれぞれ光地上局望遠鏡の Az、El 方向の仰角、および SOTA-光地上局間の距離を示している。光地上局側から出射するビーコン光に対して SOTA は送信光を送るので、Downlink 光の測定時間はビーコン光の出射時間に依存する。ビーコン光が出射される時間は望遠鏡の仰角によって決まっており、衛星が光地上局上空を周回する軌道は毎回異なる。そのため、測定時間は実験ごとに

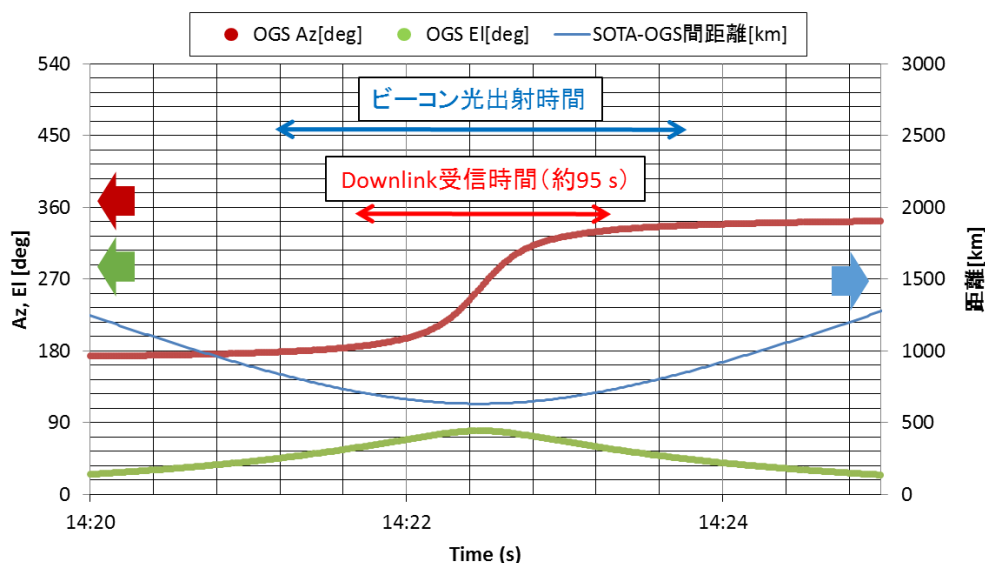


図 5-8 実験時の望遠鏡 El、Az 角度および衛星-地上局間距離

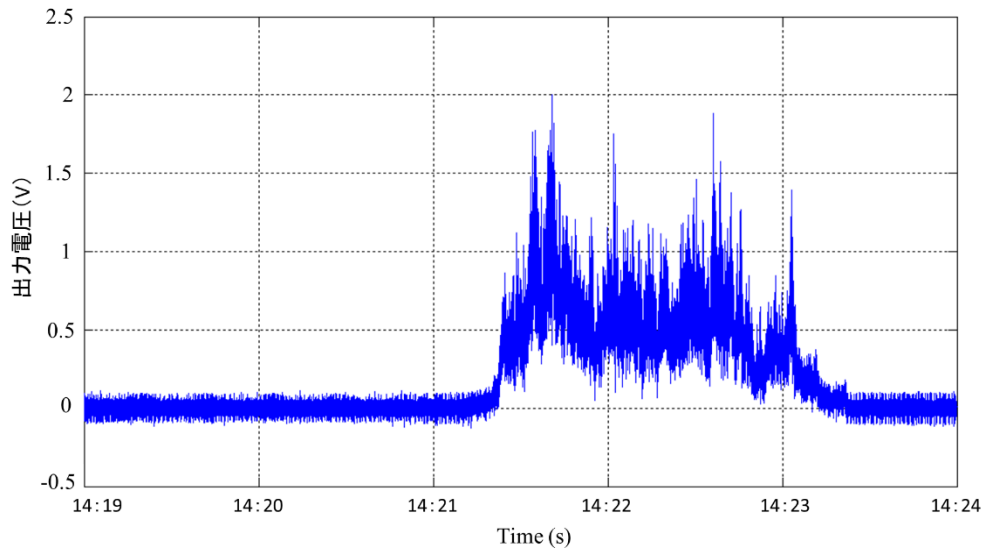


図 5-9 Downlink 光の強度変動

ことなるが図 5-8 の場合では約 3 分程度が照射時間であった。Downlink 光受信時間は約 95 秒であり、測定出来た時間帯は実験中最も EI の高い位置での測定となった。図 5-9 にビーコン光出射から終了まで記録し続けたデータロガーによる Downlink 光の強度変動を示す。14 時 21 分 30 秒ごろから受光パワーがあがり始め 14 時 23 分以降でビーコン光の出射が終了している。本実験で Downlink 光を受信するセンサおよび PM は前章で述べた電通大-NICT 間通信実験で受信光学系に用いたものと同等のものであり、データロガーのサンプリングレートを 20 kHz として測定している。受信光の強度変動を見ると細かい変動と数秒間隔の緩やかな変動が見られる。本実験では衛星の軌道を予測し望遠鏡の仰角を自動で駆動させる。しかし、追尾には若干の誤差があり事前の調整にて決められたカメラの位置に受信光の輝度中心が重ならないことがある。その際は、モニタールームにいる人がカメラの映像を見ながら手動にて望遠鏡の仰角を微調整し補正している。望遠

鏡の微調整が大きなゆらぎの原因であると推測できる。さらに、図 5-8 からわかるように衛星の距離は一定でないため地上付近でのビームの強度分布が変化することも要因であると考えられる。

電通大・NICT 間通信実験では伝搬距離は一定であったが衛星・地上間での通信実験では衛星の位置は移動しているため通信距離は変化する。大気圏外の衛星の位置が地上局から遠ざかる分には大気ゆらぎの影響に変化はないと考えられるので送信光には影響しない。しかし、衛星の仰角によっては地上付近の大気層を伝搬する距離が変わるため、これを考慮してカップリング効率を計算しなくてはならない。地上から約 20 km の間にあり、地球大気の質量のうち 75 %を含む対流圏を大気ゆらぎに影響する層と考え、衛星地上間でレーザ光が対流圏を伝搬する距離を計算する。図 5-10 に計算した伝搬距離を示す [14]。El 角 90° の時を伝搬距離 20 km とし、Downlink 光を受信している時間とその時の望遠鏡の El 角度を基に計算している。今回の測定では受信し始めてから 50 秒前後が一番距離の短い時間であったと分かる。

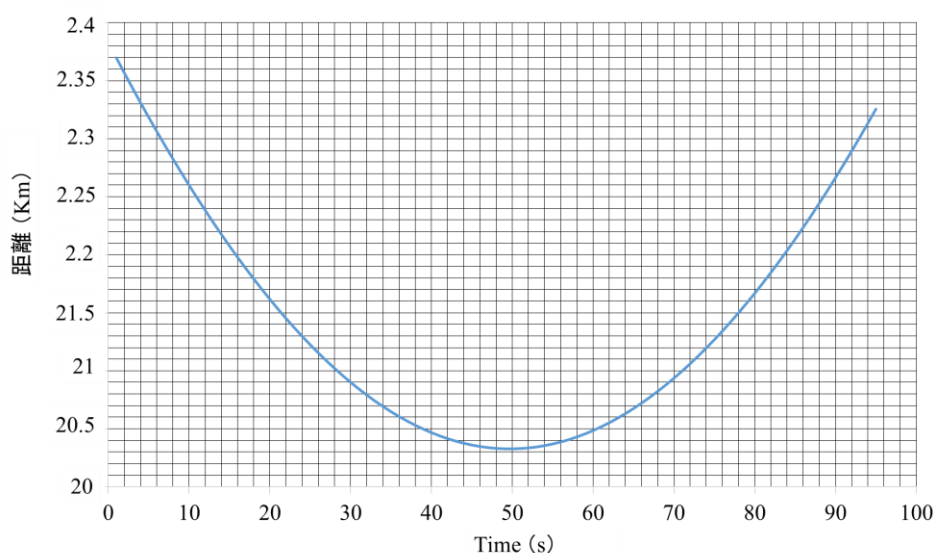


図 5-10 レーザ光の対流圏伝搬距離

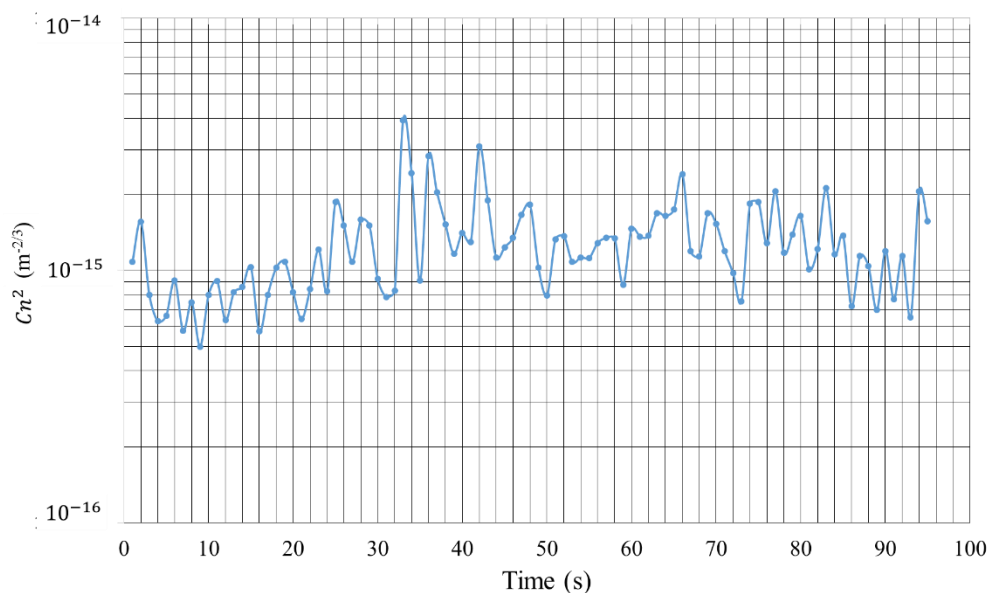


図 5-11 SOTA 実験時における C_n^2 の時間変化

以上の伝搬距離を考慮し、求めた強度変動から大気ゆらぎの大きさを表す屈折率構造定数 C_n^2 の時間変化を図に示す。図 5-11 は C_n^2 を 1 秒毎でプロットしている。約 95 秒間の中で C_n^2 の最大値は 4×10^{-14} であり最小値は 5×10^{-15} となった。第 3 章で述べた C_n^2 を求める計算式は水平伝搬を前提とした計算式であり、 C_n^2 の値を距離によって平均化して求めている。衛星-地上間通信のように高度が変化する場合は、本来大気の種類によってレーザ光が受ける大気ゆらぎの影響はそれぞれ異なる。今回の計算ではそれぞれの大気の状態を伝搬距離によって平均化し C_n^2 を計算している。一方、第 2 章で紹介した H-V モデルのように C_n^2 を高度のパラメータによって変化させたモデルも存在する。このモデルでは高度によって一定の値を持つ C_n^2 を理論的に求めることが出来る。しかし、実際は伝搬する大気や地表付近の気温、湿度などによって大気ゆらぎはその時々で変化する。今回の測定から、平均的な

C_n^2 を衛星からのレーザ光を用いることで計算し、時間的な変化とその変化した値を求めることが出来た。

図 5-12 に、以上の C_n^2 をもとに理論的に計算したカップリング効率の時間変化を示す。計算の際に仮定した受信光学系のパラメータを表に示す。コア径は、SOTA 側からの信号を受信している SOTA 受信機の受光素子の大きさ以下となる 200 μm としてシミュレーションを行った。平均的なカップリング効率は 0.38 であり、最高値 0.54、最低値は 0.17 となった。平均値から考えると Downlink 光はファイバに結合する際、約-4.2 dBm 減衰することになる。晴れた日に SOTA から送られる Downlink 光はナスミス台直前で-35~-40 dBm 前後のパワーで受信できることが確認できている。SOTA 受信機の最低受信感度は-54dBm であるため、本実験の受信光学系において BS、ファイバカップラによる損失を考慮しても Downlink 光を検出できると考えられる。しかし、地上ビル間の通信と比べ移動体との通信では C_n^2 の変動が激しく、約 95 秒間の測定の中でカップリング効率が大きく変化する。今回のシミュレーションでの最低値の場合、-7.7 dBm の損失となり平均値より 50 % 近く減衰する。最大値と比べると 5 dBm 近くカップリング効率に変動があるため、これを考慮して回線設計を行う必要がある。本実験において SOTA から送られる信号は 10 Mbps が最速であるため、NA 0.37 の MMF なら理論上数十メートル伝搬させても分散による影響はないと考えられる。また、仮に Gbps クラスの高速通信を考えた場合、センサ有効直径 0.2 mm、遮断周波数 0.9 GHz をもつアバランシェフォトディテクタ (APD) が市販されているため、これを用いるとシミュレーションから 7.5 m まで上記の MMF が利用できると分かる。一方、3.0 Gbps の高速通信を考えた場合、市販のセンサでは有効直径 55 μm の APD が利用できるが、コア径はセンサの有効直径に合わせると 50 μm の MMF にする必要がある。コア径 50 μm 、NA 0.22 と仮定しシミュレーションすると、カップリング効率は最大 7 %、最小 1.5 %、平均 4.2 %であり、MMF の伝送帯域を考えると 9 m まで利用可能となる。

最小値から考えると MMF にカップリングする過程で-15 dB 減衰する事になる。
 200 μm ファイバに比べ大きな減衰となるため、センサの感度が足りない場合には
 低速の追尾機構などの使用も検討すべきである。

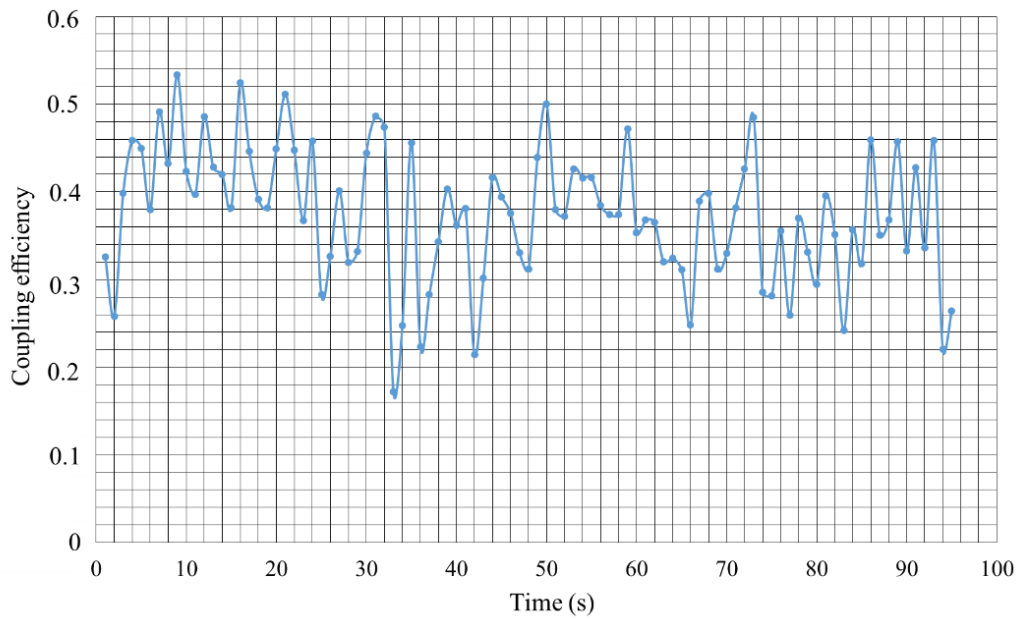


図 5-12 シミュレーションによるカップリング効率の時間変化

表 5-2 シミュレーションに用いたファイバ、受信光学系パラメータ

波長		1550 nm
開口径		1 m
ファイバのパラメータ	入射光のビーム径	100 μm
	入射角	0.25 ($\sin \theta$)
	ファイバのコア系	200 μm
	NA	0.37 ($\sin \theta$)

第6章 結論

空間光通信はレーザ光を用いた高速大容量通信が可能であり、秘匿性が高く、新たに光ファイバを敷設する必要がないといった利点から地上ではファイバネットワークのインフラ補完として注目されている。さらに衛星通信の分野においては、RF 通信に代わる大容量通信手段として衛星・地上間での空間光通信の研究が盛んに行われている。先行研究では低軌道上を周回する衛星と地上との光通信実験に成功している。しかし、天候の悪い日ではレーザ光が雨や雲によって減衰、遮断されてしまうため安定した通信を行う為には複数の通信路の確保が必要である。サイトダイバーシチの考えでは複数の地上局と地上の光ファイバネットワークを用いることで雲によるレーザ光の遮断を防ぐことが出来る。ファイバネットワークのインフラ補完、及びサイトダイバーシチについて考えた際、空間光通信システムの簡易化はそれらの実施を促進させる重要な研究課題である。

本研究では、空間光通信システムの簡易化を目的としたファイバ直接結合の空間光通信システムを採用し、実験と理論の双方から適用の有用性を評価した。具体的には、実際に MMF を用いたファイバ直接結合の空間光通信システムを約 7.8 km 離れた地上ビル間に構築し通信実験を行った。この時、大気の局所的な屈折率分布の変化によりレーザ光は大気ゆらぎの影響を受け、通信品質が劣化してしまう。さらに、PD をアンテナに取り付け送信光を受信する空間光通信システムと比べ、ファイバで直接大気伝搬したレーザ光を受信する場合では到来角変動の影響により受信強度の減衰はさらに大きくなる。大気伝搬後のレーザ光の MMF へのカップリング効率は大気ゆらぎの大きさによって変化するため、実験によって大気ゆらぎとカップリング効率の変化について測定し比較した。さらに、幾何光学的な観点からレーザ光が MMF へ結合する際のカップリング効率を求める理論式を

拡張し、水平伝搬したレーザ光のカップリング効率を求める理論モデルを導出した。理論モデルによるシミュレーションには、ファイバ端面での反射損失も考慮しているため、より実測値に近い値を表すことができた。実験によって得られたデータとシミュレーション結果を比較すると、 C_n^2 の大きさが $10^{-15} \sim 10^{-16} m^{-2/3}$ と変化する中で双方の誤差は最大 11 %となることが分かった。シミュレーション結果は大気ゆらぎによるカップリング効率の変化を実測値に近い形で再現しており、誤差範囲も先行研究と比較しても非常に小さいものとなった [33]。さらに、交通や人口の比較的多い都内において、昼夜に C_n^2 の変化が $10^{-15} \sim 10^{-16}$ と比較的小さいことが分かった。また、本実験では C_n^2 の変化が一番大きい時間にてカップリング効率の測定を行っているが、変化が $10^{-15} \sim 10^{-16}$ の範囲でのしか検討が行われていない。装置の設置環境から雨天時の測定が行えないことなど、測定に制限があるが、今後は違う季節での測定を行いより広い C_n^2 の変化に対してカップリング効率を測定していきたい。

次に、地上-衛星間における MMF へのカップリング効率を衛星から送信されたレーザ光の強度変動を基にシミュレーションし、簡易化に向けてその有用性を検討した。具体的には、2015 年に打ち上げられた小型衛星に取り付けられた SOTA と地上との光通信実験で得られたデータからカップリング効率のシミュレーションを行った。シミュレーションで用いるパラメータ C_n^2 はいくつかの理論モデルが存在するが、実測したデータから C_n^2 を算出した例はない。そのため、地上-衛星間通信実験において C_n^2 の算出方法は水平伝搬の実験で用いた理論モデルを用いシミュレーションを行う。この際、得られる C_n^2 の値はレーザ光が伝搬した距離にて平均化された C_n^2 であり、高度による対流圏内の伝搬距離の変化が考慮されている。理論モデルによる検証では C_n^2 の値が高度によってある一定の値に定義されてしますが、実際の大气の状況は刻一刻と変化しているため実測値に基づくカップリング効率の検討は有意義であると考え。通信実験から 95 秒間レーザ光を受信する

ことが出来、強度変動からカップリング効率を計算した結果、コア径 200 μm 、NA0.37 の MMF を利用した場合、平均的なカップリング効率は 0.38 であり、最高値 0.54、最低値は 0.17 となった。シミュレーションに用いたパラメータは実際に光地上局 1.0 m 望遠鏡のナスミス台に設置されている光学受信系の仕様を参考に行った。地上ビル間の実験とは異なり移動体との通信では受信光の強度変動が大きく、カップリング効率も 95 秒間で大きく変化することがわかった。最低値から考えると Downlink 光はファイバに結合する際、約-7.7dBm 減衰することになる。SOTA 受信機の最低受信感度と本実験の受信光学系の仕様を考慮すると、シミュレーションから受信機で信号を十分受信できるという結果になった。今後は、SOTA 実験の進捗に合わせて、地上-衛星間のカップリング効率を実測しシミュレーション結果との比較を行って行きたい。

本論文の研究成果が、空間光通信におけるシステムの簡易化に寄与するものだと考えている。様々な条件での測定、および定常的な MMF の使用に向けて改善、検討しなければならない課題が多くあるため、今後も研究を進めていきたいと考えている。

引用文献

- [1] 高山佳久, “衛星光通信の現状と展望,” 電子情報通信学会 Vol.J94-B No.11 pp.1443-1451, 2011.
- [2] 高山佳久, 佐々木崇, 竹中秀樹, 豊嶋守生, “小型光通信装置を用いたレーザ光の伝搬実験,” 電子情報通信学会 論文誌 SANE SAT, 2012.
- [3] A.Alonso, M.Reyes , Z.Sodnik, “ Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the Optical Ground Station,,” in Remote Sensing, J. D. Gonglewski and K. Stein, eds. International Society for Optics and Photonics,, 2004.
- [4] M.Toyoshima, S.Yamakawa, T.Yamawaki, K.Arai, M.Reyes, A.Alonso, Z.Sodnik , B.Demelence, “Ground-to-satellite optical link tests between Japanese laser communications terminal and European geostationary satellite ARTEMIS, ” in Lasers and Applications in Science and Engineering, G. S. Mecherle, C. Y. Young, and J. S. Stryjewski, eds. (International Society for Optics and Photonics, 2004), pp. 1—15..
- [5] Z.Sodnik, B.Furch , H.Lutz, “Optical Intersatellite Communication,” IEEE J. Sel.Top. Quantum Electron. 16, 1051—1057, 2010.
- [6] 竹中秀樹 , 豊嶋守生, “地上-衛星間光回線を用いた精追尾機構の動作実証,” 電子情報通信学会 論文誌 SANE2009-29, 2009.
- [7] 有本好徳 電気通信大学大学院, 博士論文.
- [8] 吉武康裕, 吉田実, 針山達雄, “シャックハルトマンセンサの画像による波面収差繋ぎ測定技術,” 精密工学会誌 Vol.77 No.7 pp676-680, 2011.

- [9] 高山佳久, 国森裕生, 竹中秀樹, 小山善貞, 豊嶋守生, “光地上局の簡易化に向けた検討,” 電子情報通信学会 論文誌 SAT2012 -14, 2012-7.
- [10] 高橋浩一, 電気通信大学大学院, 博士論文, 2011.
- [11] L. C. Andrews, R. L. Phillips, “Laser Beam Propagation Through Random Media,” SPIE-International Society for Optical Engineering, first ed., 1998.
- [12] 有本好徳, “結合による空間光通信機的设计と性能評価,” 電子情報通信学会 論文誌 C Vol. J91-C No.1 pp.38-49, 2008.
- [13] J. W. Goodman, 統計光学, 丸善, 1992.
- [14] Larry C Andrews, Ronald L. Phillips, Cynthia Y. Hopen, “Laser beam scintillation with applications,” SPIE press P.O. box 10 Bellingham, Washington 98227-00110 ISBN 0-8194-4103-1.
- [15] A. Kolmogorov, The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers, Dokl. Akad. Nauk SSSR 30, 9—13, 1941.
- [16] R. Beland, Propagation through atmospheric optical turbulence, in The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook, F. G. Smith, Ed., SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 1993.
- [17] H. Yuksel, C. C. Davis, L. Wasiczko, “Aperture Averaging Experiment for Optimizing Receiver Design and Analyzing Turbulence on Free Space Optical Communication Links,” CTUG4 2005 Conference on Lasers & Electro-Optics(CLEO), 2005, pp.743-745..
- [18] Larry C Andrews, Ronald L Phillips, chard J Sasiela, Ronald R Parenti,

- “Strehl ratio and scintillation theory for uplink Gaussian - beam waves: beam wander effects,” *Opt. Eng.* 45, 7, pp.076001-1~076001-12, 2006.
- [19] 鈴木悠太, 電気通信大学大学院 修士論文, 2014.
- [20] J.C.Palals, *Fiber optic communications*, Prentice-Hall Inc., 1984.
- [21] A. Yariv , P. Yeh, “ *Photonics: Optical Electronics in Modern Communication*,” Oxford Univ. Press , 2006.
- [22] G. C. Higgins, “ *Methods for Engineering Photographic Systems*,” *APPLIED OPTICS* / Vol. 3, No. 1 / Januarv , 1964.
- [23] J. Niu , J. Xu, “Coupling efficiency of laser beam to multimode fiber,” *Opt. Commun.*, Vol. 274, No. 2, pp. 315-319, 2007.
- [24] X. Ji , X. Shao, “Influence of turbulence on the beam propagation factor of Gaussian Schell-model array beams,” *Opt. Commun.*, Vol 283, No. 6, pp. 869-873, 2010.
- [25] A.Yariv , P.Yeh, *Optical electronics*, Oxford University Press.
- [26] Gerd Keiser, “*Optical fiber communications*,” 3rd edition, McGraw-Hill Higher Education, Singapore 2000. Chap. 3..
- [27] P. Liu, K. Kazaara, K. Wakamori , M. Matsumoto, “Studies on Cn2 and its effects on free space optical communication system,” *Information and Telecommunication Technologies (APSITT)*, 2010 8th Asia-Pacific Symposium on , vol., no., pp.1-6, 15-18 , June 2010.
- [28] 國森裕生, 豊嶋守生 , 高山佳久, “光地上局システムの開発,” *情報通信研究機構季報* Vol. 58 Nos. 1/2 , 2012.

- [29] 宗正 康, 竹中秀樹, ディミタル・コレフ, 岩切直彦, 秋岡眞樹, 小山善貞, 國森裕生, 高山佳久 , 豊嶋守生, “超小型光通信機器(SOTA)軌道上実験の準備状況,” 第 58 回宇宙科学技術連合講演会講演集 SASS-2014-4604, 2014.
- [30] 矢野 圭一, 高山 佳久 , 行田 弘一, “大気の屈折率構造関数測定およびビームの評価,” 第 58 回宇宙科学技術連合講演会講演集 JSASS-2014-4614, 2014.
- [31] 秋岡眞樹, 高山佳久, 小山善貞, 三宅明 , 山田守, “SOCRATES 及び SOTA の開発と初期運用について,” 第 58 回宇宙科学技術連合講演会講演集 JSASS-2014-4603, 2014.
- [32] Yoshisada Koyama, Morio Toyoshima, Yoshihisa Takayama, Hideki Takenaka, Koichi Shiratama, Ichiro Mase , Osamu Kawamoto, “ SOTA:Small Optical Transponder for Micro-Satellite, ” 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications978-1-4244-9685-3/11, 2011.
- [33] 竹中秀樹, 電気通信大学大学院、博士論文, 2015.

図目次

図 1-1	サイトダイバーシティのイメージ.....	3
図 1-2	地上ビル間空間光通信のイメージ.....	4
図 1-3	PD をアンテナに直接取り付けた受信装置.....	5
図 1-4	簡易化を目的としたファイバ直接結合の受信装置.....	5
図 2-1	大気ゆらぎによる像の歪み.....	8
図 2-2	屈折率ゆらぎのパワースペクトル密度.....	10
図 2-3	SLC モデルにおける高度と屈折率構造パラメータの関係.....	12
図 2-4	到来角変動.....	14
図 2-5	大気ゆらぎによるレーザ光照射エリアの時間変動.....	15
図 2-6	衛星-地上局の位置関係.....	16
図 3-1	光ファイバの構造.....	18
図 3-2	ファイバ内を伝搬する光の様子.....	18
図 3-3	光の伝搬モードのイメージ.....	19
図 3-4	上：マルチモードファイバ 下：シングルモードファイバ.....	20
図 3-5	MMF によるモード分散.....	20
図 3-6	光ファイバ端面での反射損失.....	21
図 3-7	フレネル反射のイメージ.....	22
図 3-8	角度変化に対する反射率（屈折率：空気 1→シリカ 1.45）.....	22
図 3-9	Ge ドープの石英ガラスファイバの減衰.....	23
図 3-10	水平伝搬 1 km を想定した大気の透過スペクトル.....	24
図 3-11	大気ゆらぎ測定の概要.....	25
図 3-12	開口径の変化に対するシンチレーションインデックスの変化.....	26

図 3-13	$M2/MF2$ に対するカップリング効率の変化.....	29
図 3-14	通信距離に対するカップリング効率変化	31
図 3-15	$Cn2$ の変化に対するカップリング効率.....	31
図 3-16	MMF における伝搬距離に対する伝送可能な帯域幅	32
図 4-1	通信実験を行ったフィールド	33
図 4-2	上:電通大屋上に設置したドーム 下:ドーム窓から見たレーザ光の 伝送路.....	34
図 4-3	実験システムの構成概要	34
図 4-4	NICT 側実験装置構成と受信光学系の写真	36
図 4-5	受信光学系.....	37
図 4-6	ドーム内実験装置と送信光学系の写真.....	38
図 4-7	実験手順	39
図 4-8	一日の $Cn2$ の変化.....	40
図 4-9	IR カメラによる受信光の輝度変動.....	42
図 4-10	MMF へのレーザ光のカップリング効率.....	43
図 5-1	光ファイバを用いた光地上局簡易化のイメージ	45
図 5-2	SOTA を用いた衛星-地上間光通信実験の全体構成.....	48
図 5-3	SOTA シミュレータ外観	49
図 5-4	1.0 m 望遠鏡格納建物外観.....	50
図 5-5	1.0 m 望遠鏡本体外観.....	51
図 5-6	1.0 m 望遠鏡ナスミス台の光学受信系.....	52
図 5-7	1.0 m 望遠鏡ナスミス台の光学受信系システム概要	52
図 5-8	実験時の望遠鏡 El、Az 角度および衛星-地上局間距離.....	53
図 5-9	Downlink 光の強度変動	54
図 5-10	レーザ光の対流圏伝搬距離.....	55

図 5-11	SOTA 実験時における Cn2 の時間変化.....	56
図 5-12	シミュレーションによるカップリング効率の時間変化.....	58

表目次

表 3-1	ファイバおよび受信光学系のパラメータ	30
表 4-1	受信光学系の仕様	37
表 4-2	測定日の気象情報	41
表 5-1	SOTA 仕様	50
表 5-2	シミュレーションに用いたファイバ、受信光学系パラメータ	58

謝辞

主任指導教官として日頃ご指導頂いた情報システム学研究科の高山佳久客員准教授、指導教官としてご指導頂いた情報システム学研究科の末廣尚士教授、佐藤俊治准教授に感謝いたします。著者の所属する研究室から先輩として直接研究にご協力いただいた情報通信研究機構宇宙通信システム研究室の竹中秀樹氏に感謝いたします。

また、独立行政法人情報通信研究機構においては、研究について多くのアドバイスをいただいた宇宙通信システム研究室の方々に感謝いたします。同研究機構にて、電通大-NICT 間通信実験で研究にご協力いただいた量子 ICT グループの方々に感謝いたします。

また、本研究実施に向けて準備段階から共に協力頂いた首都大学東京システムデザイン研究科博士前期課程の渡邊友浩氏、芝浦工業大学大学院理工学研究科博士前期課程の矢野圭一氏に感謝いたします。

また、本研究成果を国際会議にて発表した際、発表の準備に関してご指導や研究内容についてのご助言を頂きました電気通信大学レーザ新世代研究センターの武者満准教授に感謝いたします。